Numero 295
Marzo 1993
Anno XXVI
Volume L

Tradizione e innovazione nella scuola europea

I sistemi educativi dei vari paesi europei differiscono più per risorse e metodi di gestione che non per contenuto didattico; per tutti si pone il problema di un adattamento alla mutata fisionomia della società civile

di Francesc Pedró

Nonostante le diversità nazionali e culturali, le scuole dei paesi europei condividono in buona parte una comune tradizione educativa, che prende le mosse dalla *paideia* greca e giunge fino a noi dopo avere sperimentato le profonde influenze della romanizzazione, della cristianizzazione e una progressiva incorporazione della razionalità e della scienza moderna dall'Illuminismo in poi. Il risultato di questo processo è una serie di schemi generali circa il modo di insegnare e apprendere - il cosiddetto curricolo - e le pratiche che con questi schemi sono in relazione. Tutto ciò costituisce il comune substrato del modo di concepire l'educazione in tutta l'Europa.

L'impostazione essenzialista, erede del *trivium* e del *quadrivium* medievali, propone che la scuola trasmetta i contenuti che, secondo i canoni del classicismo, costituiscono l'essenza della cultura; si incarna in istituzioni secolari che conservano, anche ai nostri giorni, nomi di ascendenza classica, come il *Gymnasium* tedesco, il liceo italiano o la *grammar school* inglese. Secondo il punto di vista enciclopedista, che dà origine invece ad altre denominazioni richiamanti alla modernità (per esempio *Realschule* e *modern school*) ciò che deve essere insegnato è tutta la conoscenza umana disponibile, specialmente quella che proviene dalla scienza e dalla sperimentazione, in quanto ci avvicina alla vera natura del mondo. Un particolare risalto a quelle forme del sapere utili a fini produttivi ed economici è caratteristico dell'orientamento politecnico, che si autodefinisce pragmatico, in quanto considera missione della scuola il preparare l'individuo a un migliore modo di affrontare la vita quotidiana, privilegiando temi come la salute, l'ambiente, la vita familiare, la partecipazione civica.

I sistemi educativi reali di ciascun paese, naturalmente, non rispondono in esclusiva all'una o all'altra impostazione, ma le combinano in misura diversa; lo stesso vale nell'ambito ristretto del centro scolastico e nell'attività didattica del singolo docente. Tuttavia, al di sopra di queste differenze, da oltre trent'anni ciò che si studia nella scuola europea è essenzialmente lo stesso in tutti i paesi. Neppure la forma di Governo di una nazione pare introdurre rilevanti differenze nel modo di adattarsi alle situazioni o di affrontare i problemi esistenti. A dire il vero, negli ultimi anni, i Governi di stampo conservatore o neoliberale (specialmente nei paesi con strutture politiche decentralizzate) si sono dimostrati più pronti a questo adattamento e hanno adottato misure correttive con maggiore sollecitudine. Certamente le stesse strategie sono comuni anche a Governi di ispirazione socialdemocratica, sebbene con motivazioni alquanto diverse. Anche sul piano educativo i risultati si sono dimostrati notevolmente simili ed equivalenti.

In termini generali, l'organizzazione degli studi in Europa si struttura su una ripartizione delle conoscenze per materie, con incorporazioni progressive delle nuove acquisizioni in ciascuna di esse. Forse per questo motivo si parla di crisi dell'educazione?

È difficile dire il perché, ma l'educazione sembra essere stata sempre in crisi. Già da alcuni decenni, tra noi che ci dedichiamo professionalmente allo studio dei fenomeni educativi, si è rafforzata la convinzione che l'istruzione sia in una profonda crisi. E siamo andati comunicando questa stessa convinzione ai nostri allievi. Inoltre abbiamo continuato a raccomandare la lettura di *The World Crisis of Education* di Philip Coombs, uno dei membri fondatori dell'International Institute of Educational Planning (IIEP). Fin dalla prima edizione del 1968, quest'opera [comparsa in italiano come numero della rivista «Formazione e lavoro», ENAIP/ACLI, n. 29, gennaio-febbraio 1968], con i successivi aggiornamenti, è stata un vero *best seller* di argomento pedagogico.

Può darsi che tutto ciò sia intrinseco alla natura stessa del processo educativo (che implica un educatore, un educando e alcuni contenuti che il primo vuole che l'altro, non sempre di buon grado, apprenda); esso è di per sé sufficientemente problematico, come lo sono, in generale, tutte le relazioni umane. In ogni caso, se si considera l'educazione in una prospettiva diacronica, l'esperienza dimostra che ha maggiori probabilità di «aver ragione» chi punta tutte le sue carte sulle tendenze conservatrici che non chi preferisce avventurarsi su un terreno nuovo.

Un esempio sarà sufficiente: a cavallo fra gli anni sessanta e gli anni settanta sembrava scontato che in breve tempo si sarebbero imposte le teorie dei difensori della cosiddetta descolarizzazione, vale a dire, si sarebbe giunti all'abbandono delle strutture didattiche tradizionali in favore di nuove formule, molto più flessibili e meno accademiche, nelle quali il docente avrebbe svolto funzioni, soprattutto, di «accompagnatore», di pedagogo, nell'accezione originale del termine greco. In questo nuovo ordine educativo, secondo le teorie formulate da Everett Reimer o da Ivan Illich, le nuove tecnologie si sarebbero occupate della trasmissione dei contenuti, cioè della «mera istruzione», mentre il momento propriamente educativo si sarebbe attuato nei rapporti sociali con i compagni o con gli adulti.

In parte ciò si è realizzato: nei paesi dell'Europa comunitaria è quasi impossibile trovare una scuola pubblica nella quale non vi siano calcolatori personali o apparecchiature audiovisive con qualche applicazione didattica; tuttavia non pare che questa presenza si sia tradotta in un cambiamento significativo del ruolo dei docenti in aula, né tantomeno in una tendenza verso la descolarizzazione. Anzi, non mancano le ragioni a coloro i quali sostengono che la pressione dei contenuti è tale da non lasciare ai docenti tempo disponibile per l'utilizzazione di questi nuovi metodi. In ogni caso, la forma dell'insegnare e dell'apprendere nella scuola europea non ha subito, nel corso degli ultimi 50 anni, modificazioni adeguate ai progressi dell'evoluzione tecnologica.

Dopo la fine della seconda guerra mondiale, i paesi dell'Europa occidentale intrapresero un'affannosa opera di ricostruzione nazionale. In essa, la scuola aveva un posto chiave. Mai, prima di allora, si era assistito a un simile concorso

di sforzi per propagare gli ideali e i valori democratici al fine di realizzare la ricostruzione morale ed economica dell'Europa. L'aumento della natalità che si verificò in quel periodo impose grandi investimenti in materia di edilizia scolastica, di insegnanti, di libri e materiali didattici, investimenti fortunatamente possibili in quel periodo di prosperità economica.

La teoria del capitale umano contribuì a rafforzare la convinzione comune che la ricchezza di un paese dipendesse, in definitiva, dalla sua capacità di investire nell'educazione, nella formazione quindi di questo capitale umano. Nessuno però si preoccupò nel frattempo di valutare il rendimento di questi investimenti, allo stesso modo in cui si trascurò di considerare che la crescita economica dipendeva da un prezzo molto favorevole del petrolio importato, almeno fino a quando la crisi energetica degli anni settanta non fece aprire gli occhi.

Per questa ragione, i progetti attuali di sviluppo non hanno nulla a che fare con la cieca euforia degli anni sessanta in fatto di investimenti sull'educazione. L'educazione europea non risponde, oggi come oggi, alle speranze, alle situazioni e ai problemi degli anni passati, né dal punto di vista della socializzazione (si pensi alla rilevanza di temi come la violenza e le tossicodipendenze), né da quello dello sviluppo culturale e scientifico (con la perdita della *leadership* europea in materia scientifica e tecnologica) e neppure dal punto di vista economico. Se, come si ritiene, non è possibile insegnare qualcosa di molto diverso da ciò che attualmente si insegna nella scuola, forse il problema sta nel modo di insegnarlo e, soprattutto, nella scarsa preoccupazione per i risultati e la loro valutazione.

Oggi, nel contesto dell'Europa comunitaria, i politici, gli imprenditori e naturalmente le famiglie, sostengono che qualcosa non funziona; che la corrispondenza fra società, cultura, economia, scienza, tecnica e scuola non è quella auspicabile; che l'educazione europea deve, insomma, cambiare per superare la crisi nella quale si trova. Da parte loro, i docenti ritengono che la crisi sia prima di ogni altra cosa il risultato della recessione economica e della perdita di fiducia nei benefici degli investimenti nel settore dell'educazione.

La questione economica

Dopo gli sforzi realizzati per migliorarla, l'educazione si presenta attualmente agli amministratori pubblici come un pozzo senza fondo. È come con la gestione della sanità: le sue richieste, quantitative e qualitative, sono sempre crescenti e nulla può completamente soddisfarle. Lo Stato si trova sovraccaricato da queste e da altre necessità, senza essere in grado di farvi fronte; esso tende pertanto a stabilire priorità per la spesa pubblica, ma in questo modo l'educazione si trova a competere con altre possibili destinazioni dei fondi che di volta in volta possono apparire più necessarie o urgenti. Nei paesi comunitari l'educazione ha ormai finito di essere considerata al primo posto delle priorità sociali: sono subentrati i problemi della disoccupazione, dell'inserimento dei giovani nella vita attiva, della sicurezza sociale e della conservazione ambientale.

Tutti questi fattori hanno fatto sì che, negli ultimi anni, la tendenza della spesa pubblica nei riguardi dell'educazione sia andata decrescendo nella maggior parte dei paesi, se non in valore assoluto, almeno in termini relativi. Nella stessa direzione vanno le conseguenze delle misure di convergenza economica assunte dai Dodici a Maastricht. Uno studio in prospettiva condotto dall'OCSE (l'Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico) mostra che, nei prossimi 50 anni, i costi totali della spesa pubblica aumenteranno di un terzo, in termini reali, ma non in uguale misura per ogni settore: di fronte a un aumento del 40 per cento della spesa per la sanità e al raddoppio della spesa in campo previdenziale, le spese per assistenza familiare ed educazione subiranno riduzioni rispettivamente del 15 e del 20 per cento. Si tratta di tagli senza precedenti della spesa pubblica in questi settori.

Gli effetti di quella che pareva solo una cattiva congiuntura economica sono però molto più importanti di una semplice riduzione di fondi in percentuale, in quanto implicano una nuova concezione del ruolo dello Stato nell'erogazione dei pubblici servizi. I contribuenti denunciano la loro insoddisfazione per il deterioramento di questi servizi, che viene attribuito non solo a fattori come la perdita di potere d'acquisto da parte dei pubblici dipendenti, con conseguente insoddisfazione e demotivazione, ma anche all'incapacità, secondo alcuni congenita, da parte dello Stato di fornire questi servizi in modo soddisfacente ed efficiente. Si è imposto un nuovo *ethos*: lo Stato e tutti gli organi che dipendono da esso devono giustificare, rendere conto e sottomettere a valutazione i risultati conseguiti.

Nell'istogramma è riportata l'evoluzione nel tempo (per gli anni 1975-1986) della spesa pubblica destinata all'istruzione in otto paesi della Comunità europea, espressa in percentuale del prodotto interno lordo. Oltre alle notevoli disparità, si può osservare la tendenza a un'approssimazione convergente verso una quota media intorno al 5 per cento. (Dati OCSE.)

La spesa destinata all'istruzione da parte delle famiglie tende a essere in relazione inversa alla spesa pubblica nel paese corrispondente. Per quanto le cifre delle spesa privata siano più difficili da determinare di quelle della spesa pubblica, si nota dall'istogramma una recente tendenza all'aumento in diversi paesi europei. (Dati Eurostat per il 1991; OCSE per il 1990.)

Sul versante educativo, questa tendenza si manifesta alla fine degli anni sessanta negli Stati Uniti (sotto il termine *accountability*) e alla fine degli anni settanta, molto sporadicamente, nel continente europeo. Vale la pena ricordare, a questo proposito, l'impressione suscitata dalla conferenza del Premier britannico James Callaghan al Ruskin College di Oxford, nell'ottobre del 1976. In essa si poneva in risalto la necessità di dimostrare in modo credibile che la qualità dell'istruzione andava crescendo e che in nessun modo si stava verificando un abbassamento dei livelli accademici. Insomma, si finiva col sostenere che i responsabili dell'educazione dovessero essere posti in condizione di rendere conto del loro operato alla collettività. L'idea secondo cui il sistema educativo deve essere valutato alla stregua di una impresa pubblica, e in base agli stessi criteri che vengono applicati alle altre imprese pubbliche, viene oggi in pratica accettata nella totalità dei paesi industrializzati, per quanto gli effetti pratici di questo principio siano ancora tutti da dimostrare.

Inizialmente, questa esigenza di valutazione è sorta dai problemi conseguenti alla attuazione, nel corso degli anni settanta, di politiche educative progressiste, come quelle relative ai programmi per uguali opportunità o per la lotta alla discriminazione razziale. All'educazione veniva assegnata una priorità molto alta, soprattutto a livello di retorica: si stabilivano finalità umanitarie di carattere vago, giustificate nel nome di benefici economici altrettanto imprecisati.

In seguito, alla fine degli anni ottanta, la logica di questa idea è entrata a far parte dei requisiti in base ai quali si suppone debba funzionare lo Stato e i diversi rami della sua amministrazione. Il risultato finale è così divenuto più ampio e complesso del semplice esame dei processi e dei prodotti educativi, poiché mette in questione, in ultima analisi, chi debba decidere su che cosa si debba render conto e in che modo, e chi debba rendere conto e davanti a chi.

I cambiamenti sociali e le loro implicazioni educative

Un secondo aspetto della crisi è di carattere strutturale e riguarda l'adattamento dei sistemi educativi a un nuovo contesto sociale, economico, tecnologico e, in certa misura, anche demografico. Per quanto, in termini assoluti, le cifre della popolazione europea siano quasi stabili, i sistemi educativi crescono per recepire una nuova «clientela» che fino a tempi recenti contava molto poco.

Così, l'ingresso della donna nella vita lavorativa attiva è un fenomeno iniziato intorno agli anni sessanta - un poco più tardi nell'Europa meridionale - che si traduce in una domanda di istruzione, concepita in un meccanismo di promozione professionale e di mobilità sociale. La proporzione delle donne studenti in tutti i livelli scolastici è andata costantemente aumentando negli ultimi 10 anni. Per quanto riguarda la scuola materna, la scuola dell'obbligo e la scuola superiore, la percentuale femminile equivale a quella dei maschi in quasi tutti i paesi dell'Europa comunitaria. A livello universitario però, soprattutto nel campo scientifico e tecnico, c'è ancora molta strada da fare verso la parità. E non si tratta solamente di un dato quantitativo: bisogna adattare i contenuti dell'educazione a una visione della società che riaffermi l'uguaglianza dei diritti tra uomo e donna e non trasmetta concezioni sessiste dei ruoli.

Esigenze analoghe vengono poste dall'immigrazione, proveniente in particolare dall'Est europeo e dal Maghreb. In Francia, nel Regno Unito o in Germania,

l'immigrazione e la pluralità etnica e culturale non sono una novità, ma le dimensioni attuali del fenomeno sono del tutto inusitate. Inoltre, in un'epoca di recessione economica, trovano alimento le tendenze razziste e xenofobe. A tutto ciò deve essere data risposta nelle aule scolastiche. Per questo vedremo aumentare negli anni a venire i programmi scolastici di educazione pluriculturale, sia per favorire l'integrazione dei figli degli immigrati (garantendo il riconoscimento della loro lingua e cultura di origine), sia per preparare i figli dei cittadini locali a vivere in un mondo di mentalità più aperta, allontanandoli dalla facile tentazione all'etnocentrismo.

Neppure possiamo dimenticare la tendenza delle nostre popolazioni all'invecchiamento. Dal punto di vista dell'educazione, ciò potrebbe essere considerato vantaggioso: la diminuzione della popolazione in età scolare dovrebbe permettere di ridurre il numero di alunni per insegnante senza aumentare i costi. Ma è difficile che si realizzi questa tendenza. Una popolazione invecchiata presenta necessità specifiche (previdenza, assistenza sanitaria eccetera) che entrano in concorrenza con l'educazione per quanto riguarda la ripartizione dei fondi. D'altra parte l'anziano esige una rinnovata attenzione pedagogica, un migliore impiego del tempo libero, un ampliamento dei suoi orizzonti culturali.

Ma il fronte più ampio e conflittuale dell'interazione fra scuola e società è, senza dubbio, quello che riguarda la preparazione al mondo del lavoro. La drastica diminuzione del numero di posti di lavoro disponibili per personale non qualificato e la domanda di una sempre maggiore preparazione professionale fanno sì che il tema dell'impiego sia uno dei più sentiti nelle società industrializzate. Accade così che le carenze del sistema educativo in rapporto al mondo del lavoro vengano percepite con estrema chiarezza. Non si tratta solo di formare giovani affinché possano accedere a un primo impiego, ma anche di offrire una formazione permanente a personale già impiegato per aumentarne l'adattabilità, la polivalenza e la mobilità.

Il dibattito circa la responsabilità del sistema educativo nei confronti di una adeguata preparazione dei giovani all'ingresso nel mondo del lavoro si complica se si prendono in considerazione coloro i quali, per ragioni diverse, non riescono a raggiungere una qualifica accademica o professionale e abbandonano la scuola precocemente. Essi si trovano ancora più disarmati di fronte a una domanda occupazionale già scarsa. Non si può escludere che questi abbandoni siano dovuti, in qualche misura, a determinate caratteristiche proprie del sistema educativo e del suo concreto meccanismo di funzionamento.

Questo gruppo a rischio è fatto oggetto di diverse politiche prioritarie nei paesi europei. Per quanto si tenti di conseguire un assottigliamento progressivo del numero di questi giovani, grazie al rinforzo e all'espansione della formazione successiva alla scuola dell'obbligo, esistono alcuni limiti probabilmente ineliminabili all'educazione di soggetti svantaggiati o meno dotati dal punto di vista dell'apprendimento. Questi giovani scelgono per lo più di entrare nel mercato del lavoro dopo nove o dieci anni di scuola dell'obbligo. Si tratta di renderli coscienti del fatto che una formazione post-obbligatoria non è una sorta di parcheggio improduttivo, ma una possibile risposta a breve o a medio termine alla mancanza di impiego.

Un nuovo orizzonte politico per l'Europa

I paesi dell'orbita comunitaria pongono come traguardo l'effettiva realizzazione dell'unione europea, vale a dire la libera circolazione dei capitali, delle merci e anche delle persone per tutto il territorio della Comunità. Le implicazioni di questa caduta delle frontiere sull'educazione non sono state finora studiate con molto dettaglio. Sappiamo per certo che, originariamente, il progetto comunitario non tenne conto del fenomeno educativo, essendo le sue motivazioni di fondo di ordine economico e politico. Oggi invece si impone un ampliamento degli orizzonti e una maggiore considerazione per la diversità delle tradizioni culturali, il che impedisce di pensare a una omogeneizzazione dei contenuti, delle strutture e dei metodi dei diversi sistemi educativi in una sorta di scuola paneuropea. Così ci si esprime negli accordi di Maastricht. Comunque si dovrebbe quantomeno tendere a una «sinfonia» di sistemi diversi, che dia come risultato, se non proprio una musica, almeno suoni vagamente armonici.

Senza dubbio, la Commissione delle Comunità europee ha fatto sforzi considerevoli per quanto riguarda l'istruzione superiore e la formazione professionale per garantire che la diversità dei sistemi educativi e di conseguenza dei titoli accademici o professionali non si riveli un ostacolo alla realizzazione del principio della libera circolazione dei lavoratori. Sono stati creati a questo fine meccanismi legali e istituzionali che agevolano il mutuo riconoscimento dei titoli e la loro convalida. Inoltre, la Commissione promuove programmi di interscambio tra studenti al fine di favorire la mutua conoscenza tra i vari paesi e programmi per incentivare l'apprendimento di altre lingue europee e anche per introdurre la tanto conclamata dimensione europea nei programmi didattici di tutti i paesi comunitari. L'enfasi sull'apprendimento di lingue straniere e la possibilità di permanenze all'estero per periodi più o meno lunghi (generalmente in coincidenza con le vacanze) sono ormai requisiti imprescindibili per qualsiasi scuola europea di un certo prestigio.

Tuttavia, anche la dimensione esclusivamente economica del progetto comunitario ha implicazioni educative che non sono passate inosservate. Le grandi multinazionali europee hanno posto in risalto in ripetute occasioni che la sopravvivenza di un'Europa che sia qualcosa di più di un semplice museo della cultura occidentale dipende, in buona misura, dalla capacità di far fronte ai livelli di competenza che si raggiungono negli Stati Uniti e in Giappone. Uno dei fattori chiave di questa competitività è, appunto, la formazione; non solo quella specializzata, ma anche la stessa formazione obbligatoria di base. È necessario poter disporre di un maggior numero di tecnici e scienziati e di una mano d'opera qualificata e polivalente.

Non sembra, però, che la formazione scientifica e tecnica sia la più attraente, oggi come oggi, per gli studenti europei. La stessa società si mostra indecisa nel momento di precisare quale sia il proposito fondamentale del processo educativo nel suo complesso e di optare tra la scuola tradizionale, basata sulla cultura classica, e l'altra, orientata a conoscenze più empiriche e utilitaristiche. Ciò si rende manifesto nelle polemiche che si levano quando si intraprendono riforme dei diversi piani di insegnamento.

Considereremo ora i diversi principi di orientamento seguiti per affrontare questo complesso di necessità, condizionamenti e problemi, poiché saranno questi a determinare i lineamenti dell'educazione europea nel futuro immediato.

Un governo decentralizzato per l'educazione

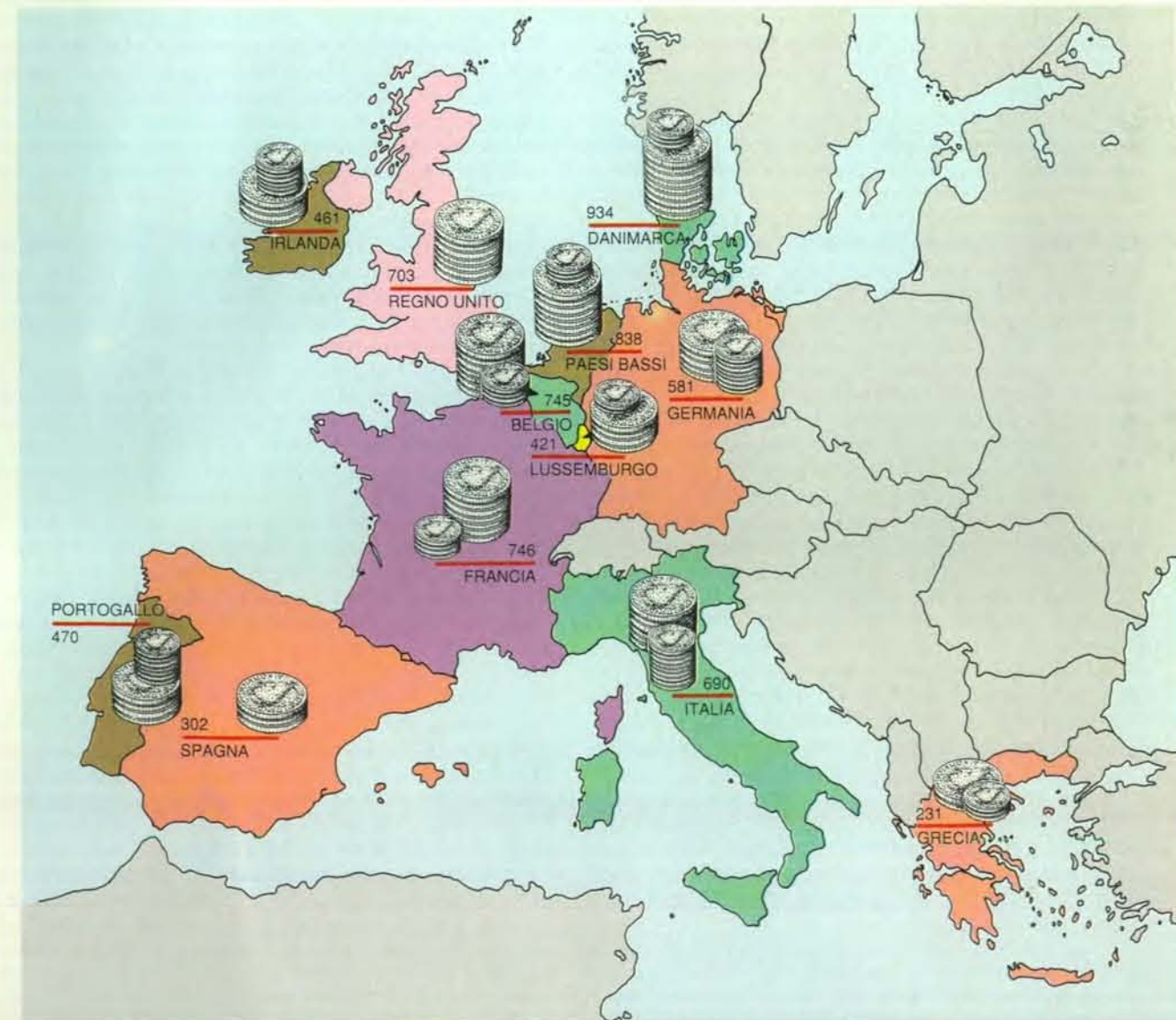
Il sistema educativo necessita di flessibilità e capacità di adattamento, il che implica, come per altri ambiti del servizio pubblico, un avvicinamento tra chi dispensa il servizio e chi ne usufruisce. Questa ridistribuzione dei poteri decisionali e di gestione tra gli organismi centrali e periferici viene presupposta nel concetto di decentramento.

Secondo Brian Holmes, professore emerito dell'Institute of Education dell'Università di Londra, è imprudente affermare in maniera categorica che un sistema di amministrazione dell'educazione debba essere centralizzato o decentrato, dato che l'assegnazione delle responsabilità nella formulazione, nell'adozione e nell'esecuzione delle politiche dipende di solito dal livello e dal tipo di insegnamento. Così, per esempio, il forte peso attribuito alle amministrazioni comunali in materia di insegnamento primario (si tratti della messa a punto dei programmi, del finanziamento alle scuole o di entrambe le cose) fa sì che in paesi come Danimarca, Paesi Bassi o Irlanda non si possa parlare propriamente di struttura amministrativa centralizzata.

Prima che negli anni ottanta la tendenza si generalizzasse, molti paesi avevano attuato misure di decentramento. La tradizione di autonomia municipale è antica nel Belgio e a essa si sono aggiunte rivendicazioni di carattere linguistico. Ognuna delle due comunità (fiamminga e vallone) ha un proprio Consiglio culturale e un proprio Ministero dell'educazione. La situazione evolve verso una maggiore importanza delle Province e dei Comuni, per quanto alcuni aspetti organizzativi (linee guida dei piani di studio, stipendi, sovvenzioni eccetera) continuino a rimanere centralizzati.

Nel 1970 si iniziò in Italia una regionalizzazione amministrativa che, senza dubbio, non ha avuto a tutt'oggi grandi conseguenze, salvo nell'ambito della formazione professionale che è di competenza delle Regioni. I Provveditorati agli studi, che agiscono in ciascuna provincia, hanno funzioni che, per quanto siano aumentate considerevolmente negli ultimi tempi, continuano a essere delegate ed esecutive. In Francia, tutte le decisioni fondamentali relative all'insegnamento obbligatorio (programmi, nomine degli insegnanti, del personale direttivo e di ispezione, localizzazione delle scuole eccetera) sono di competenza del Ministère de l'Éducation National, per quanto un recente movimento di decentramento funzionale abbia fatto sì che acquisissero maggiore importanza il Département e la figura dell'Inspecteur d'Académie, direttore dei servizi scolastici dipartimentali. Inoltre nei programmi scolastici è stato riconosciuto uno spazio a lingue di minoranze, come il basco o il catalano.

Nell'Europa meridionale, il paese che sta vivendo il processo di cambiamento amministrativo più sostanziale è la Spagna. La struttura amministrativa di base è centralizzata, ma l'istruzione, a tutti i livelli, è già stata trasferita ad alcune amministrazioni regionali autonome, come quelle di Catalogna, Paesi Baschi, Galizia, Andalusia e Valencia, in attesa di esserlo anche a tutte le altre. In ognuna di queste comunità esiste di solito una Consejería de Educación e alcune hanno creato un proprio apparato amministrativo di una certa importanza che, curiosamente, mostra di solito nel proprio ambito tendenze centralizzatrici. Il Ministerio de Educación y Ciencia continua a mantenere importanti competenze, come quelle che riguardano l'organizzazione generale del sistema educativo, i piani di studio, e l'ispezione.

Questo processo comporta peculiari difficoltà, specialmente nella determinazione di chi debba essere il principale destinatario del potere trasferito, di quali siano le competenze delle autorità regionali e locali, dei centri scolastici in quanto tali, dei corpi docenti e degli stessi in-

Questa cartina visualizza in altro modo le spese destinate all'istruzione nei diversi paesi europei. In questo caso, per poter confrontare i valori, si è scelta un'unità fittizia che tiene conto del potere d'acquisto. (I dati Eurostat si riferiscono al 1991.)

Parlare di *scuola* è lo stesso che parlare di *educazione*?

Il succedersi di giorno e notte, quindi di luce e ombra, l'alternarsi delle stagioni, con le variazioni di clima, a seconda anche di latitudine e altitudine, sono «naturali», sono manifestazioni normali (e perciò abituali) di ciò che chiamiamo l'ordine della natura. Ne conosciamo le spiegazioni in termini di nessi causali e per questo un'eclisse non sorprende e non spaventa: sappiamo che cos'è. Sulle regolarità dei fenomeni naturali ci siamo costruiti degli indicatori e degli strumenti di misura, e il tempo lo si misura in base al succedersi di luce e ombra o, in modo più preciso, in base ai movimenti degli astri. Poi siamo andati avanti. Altre esperienze della vita quotidiana ci sono talmente familiari che, inconsapevolmente, tendiamo ad attribuirle ancora «all'ordine della natura». Tra queste, appunto, la partizione del tempo scandita dall'orologio che portiamo al polso; la sera comincia per noi quando il quadrante ci mostra un certo segnale, anche se c'è un qualche scarto con le condizioni di luce (d'inverno) o con la posizione del Sole (nel periodo dell'ora legale). Una transizione dal naturale al culturale che, in senso stretto, è tutta e solo culturale, ma tanto solidamente è collegata a strutture e regole della natura che percepirla come fatto di natura non è privo di senso.

Ma anche altri fatti e fenomeni circostanti fanno tanto parte dell'esperienza individuale e sociale - appaiono cioè, ancora una volta, «naturali» - da venire inconsapevolmente percepiti come appartenenti all'«ordine naturale» come le montagne, i fiumi, il vento e la pioggia, il freddo e il caldo... Poiché è «naturale» - per gli europei continentali - circolare sul lato destro di una strada, appare patologica (nonché pericolosa) la circolazione sul lato sinistro, fisiologica invece oltre Manica; senza dimenticare che andando a ritroso nel tempo facciamo presto a trovare situazioni in cui l'idea di «mano da tenere» era sconosciuta, e tale era perché non necessaria.

A questo presunto ordine naturale appartiene la scuola. Tanto ci coinvolge, tanto regola e scandisce con i suoi tempi quelli degli individui e delle famiglie (dovrebbe essere - secondo logica - il contrario, ma non sono forse esodi e rientri, sull'arco quotidiano e su quello annuale, massicciamente condizionati da spostamenti di scolari e studenti?), tanto durevolmente stilizza e riduce a catechismi qualcosa poi definito sbrigativamente «cultura» il tentacolare organismo «scuola», che pochi riescono a fare un passo indietro per sottrarsi alla tendenza di considerarla «naturale»; tra questi anche i suoi critici. Quello che riguarda la tutt'altro che naturale *istituzione* scuola è un caso mostruoso (sia nel senso latino sia in quello italiano) di assunzione psicologica di una pretesa «naturalità», poggiante su fondamenti incerti e sabbiosi, che spesso ha luogo invadendo screanzatamente l'area, quella sì molto prossima alla naturalità in senso forte e totale, dell'educazione (visto che è difficile concepire, e ancora più individuare, un gruppo umano che non trasmetta ai propri cuccioli conoscenze, atteggiamenti, abitudini, così come procura loro cibo e protezione).

Ma la scuola virtualmente universale (ciò che viene spesso indicato come «scuola di massa») è un fenomeno che sarebbe definibile, in termini umani, «di mezza età», dato che possiamo attribuirgli concretamente, come età, il mezzo secolo del secondo dopoguerra, se badiamo alle dimensioni complessive dell'utenza. Nel caso poi si faccia riferimento ai propositi politici e sociali di democratizzazione - in quanto estensione del servizio al fine di rispondere a diritti di cittadinanza - allora l'età cresce un poco e può raggiungere al più centoventi anni, se assumiamo come riferimento simbolico le leggi Ferry del 1882. Se ci riferiamo a un certo impianto formale, a una struttura organizzativa scandita in gruppi-classe coetanei, con certe regole e certe forme, possiamo retrocedere ancora, ma non più indietro degli anni della Riforma protestante e della successiva risposta di quella riforma cattolica che siamo abituati a chiamare Controriforma; la quale ha avuto nella Compagnia di Gesù la sua «ala marciante», attiva con speciale efficacia appunto attraverso l'educazione strutturata entro la «forma-scuola» (come poi, assai più tardi, l'azione politica ha trovato struttura e supporto nella «forma-partito», ma che la politica s'identifichi col partito, qualunque partito, è una delle aberrazioni di cui si son pagati e si stanno pagando alti prezzi).

È vero che siamo il prodotto di una storia antica, le nostre radici arrivano certo fino ad Atene: c'è nel nostro passato collettivo di quanto chiamiamo, (ego-)eurocentricamente il Vecchio Mondo, la Paideia, come ci sono Quintiliano, Alcuino, Locke e Rousseau. Ma non sarebbe legittimo rintracciare allora le nostre radici nelle fertili pianure tra i due grandi fiumi che oggi traversano l'Iraq, cioè in Mesopotamia, quasi quaranta secoli fa? Non è marginale rilevare che Confucio, contemporaneo di Eraclito, precede Socrate e perciò Platone; il confucianesimo impregna la cultura, anche amministrativa, cinese, il cui mandarinato non è, come talora si crede, un patriziato ereditario, ma un'aristocrazia selezionata da esigentissime e raffinate scuole.

È vero che lo studio coordinato da Philip Coombs ha avuto risonanza enorme (meno forse in Italia, dove è apparso solo come numero di una rivista). Non è però pedanteria/pignoleria verificare se il titolo dello studio si possa correttamente tradurre come *Crisi dell'educazione* o non piuttosto come *Crisi dell'istruzione*, e per quella via, della *scuola*. Vediamo allora da dove nasce: nel 1967 si discuteva a Williamsburg, in Virginia, *The World Crisis of Education*: tale il titolo del rapporto di base, redatto dall'IIEP (International Institute for Educational Planning, UNESCO), che con quello stesso titolo veniva poi pubblicato l'anno successivo in volume, la cui edizione francese apparve come *La crise mondiale de l'éducation*. L'IBE (International Bureau of Education, UNESCO) teneva nello stesso periodo la «Conférence mondiale de l'éducation» sul tema indicato, in inglese, come *Educational Wastage*, ma in francese come *La déperdition scolaire*: differenza significativa che pone un problema assai serio. La crisi, maturata negli anni sessanta, esplosa a Berkeley, poi a Berlino, a Parigi, a Roma, a Tokyo, a Seul..., è veramente crisi dell'*educazione*? O non si tratta di crisi dell'*istruzione*? È chiaro che si tratta di crisi dell'apparato formale, dell'istituzione: ciò che è in crisi evidente, non solo europea ma planetaria, sono i «sistemi scolastici»; ma come possiamo affermare che ciò testimonia di una crisi globale e radicale dell'educazione? Si tratta, in realtà, di crisi della SCUOLA. Se l'istituzione è vista sovente come un monolite non si presenta però in modo unitario, ma con aspetti ampiamente eterogenei. Ne scrivo qui il nome con lettere maiuscole per sottolinearne l'aspetto di istituzione quale essa è storicamente nata sulla base di una esigenza concreta, cioè per contribuire a esercitare con efficacia una funzione sociale che però non si esaurisce né s'identifica nella istituzione. Anzi, qualora l'istituzione si mostri inadeguata, si può ben pensare di cambiarne, anche radicalmente, la struttura, oppure anche di estinguerla, ove sia il caso: il «Pony express» era un servizio di messaggeria rapida a cavallo attraverso le pianure nordamericane, efficiente e prezioso prima delle ferrovie, del telegrafo, del telefono, dell'aereo, ma che senso potrebbe avere mantenerlo in funzione e in allenamento oggi, nella stessa forma? Così poco che, oggi, quel nome designa (almeno in Italia) un servizio simile, ma urbano e svolto da ciclomotoristi.

Sono almeno cinque le cause che concorrono a determinare la crisi, non dell'educazione, bensì della *scuola*: *a*) espansione quantitativa (la gigantesca crescita degli apparati scolari non è stata tutta positiva: se taluni osservatori persistono a parlare di una crisi che ha luogo «*nonostante*» l'espansione, per altri è chiaro che ciò avviene «*a causa*» dell'espansione); *b*) stagnazione (o riduzione) delle risorse disponibili; *c*) aumento dei costi; *d*) deterioramento delle pratiche didattiche; *e*) inerzia delle strutture formative.

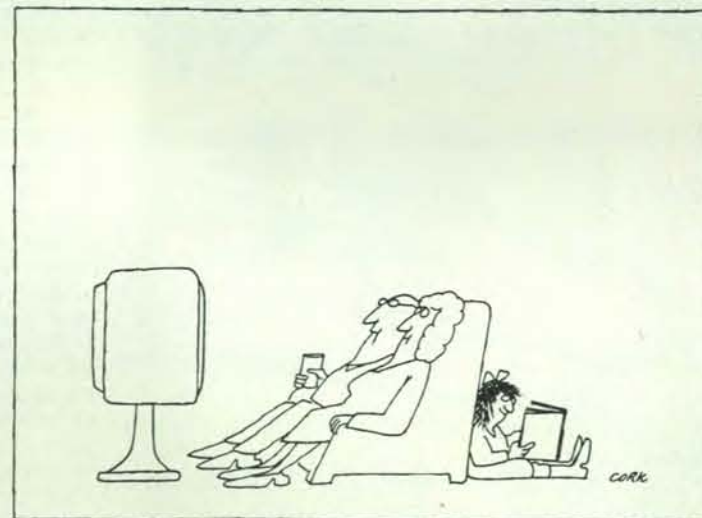
Da vent'anni si perpetua un equivoco a proposito della «descolarizzazione» proposta nelle analisi di Ivan Illich, la cui tesi non era né che la scuola si dovesse tecnologizzare (come pare suggerire Pedró in questo articolo), né tanto meno che si dovesse distruggere la scuola, ma invece che si dovesse *descolarizzare* la società (come ha poi sostenuto che si dovesse *demedicalizzare* la salute, ma sarebbe una stolta miopia fargli dire che bisogna eliminare i medici e chiudere gli ospedali). Ciò significa, nel quadro di una più ampia e generale analisi critica delle istituzioni nella società contemporanea, contrastare l'irrigidimento invadente dell'istituzione-scuola.

È del 1972 il rapporto redatto da una commissione dell'UNESCO sul futuro dell'educazione, intitolato significativamente *Apprendre à être*, centrato sull'idea-guida dell'educazione permanente, che implica una critica del tradizionale e sclerotico modello «sequenziale» per il quale l'arco vitale è segmentato in periodi legati a una funzione dominante: le fasi dell'infanzia, della formazione, del lavoro produttivo, della vecchiezza. Con insistenza vi si denuncia, del modello formale sociale, l'inadeguatezza, che cresce in proporzione alle dimensioni dell'istituzione.

Dei servizi scolastici si parla spesso, perlopiù impropriamente, come di «sistema scolastico»; il complesso degli interventi educativi entro una data società tanto più si approssima alla condizione di «sistema», non solo scolare, ma «educativo» (superando i limiti dell'apparato scolastico) quanto più riesce ad attuare il principio-guida dell'educazione permanente nel senso pieno di un'azione educativa che sia «permeante». Possiamo, in forma sintetica, chiamare *educazione* l'insieme degli interventi volti a sviluppare le facoltà intellettuali, morali e fisiche degli individui secondo determinati principî: se lo stimolo delle facoltà intellettuali lo possiamo chiamare *istruzione* e possiamo includervi l'istruzione fisica, che pure è cosa diversa, è più difficile ritenere che le «facoltà morali» possano essere oggetto di istruzione. La nozione di educazione è molto più ampia e una delle difficoltà della scuola nasce proprio di lì: con l'andamento di pendolo, la scuola conosce fasi nelle quali attenua (talvolta fino a dimenticarla) la propria funzione *istruzionale* nella direzione cognitiva, a vantaggio di una «funzione di socializzazione», tentando allora di assumerne un impossibile monopolio che non riesce a svolgere, costringendosi quindi a una pericolosa inefficacia sociale, ove pure faccia mostra di apparente efficienza; anzi si può riscontrare anche un rapporto di proporzionalità inversa tra (apparente) efficienza tecnica esterna e riscontrabile efficacia sociale (sia per quanto attiene alla funzione primaria e fondamentale dell'istruzione sia per quella di socializzazione). Efficacia che conservano, invece, altri agenti educativi (famiglia, gruppo microsociale, comunicazione di massa, associazionismo, eccetera). I successi della scuola giapponese non si possono attribuire in modo troppo meccanico alla sua - non contestabile - efficienza tecnica, senza tener conto di quant'altro si manifesti nel contesto sociale nipponico (questo ci fa tornare in prossimità di Confucio).

Che l'efficacia sociale degli interventi educativi possa talora mirare a obiettivi in contrasto con valori che noi consideriamo positivi, non muta la sostanza, e mette a nudo il nocciolo di una - eventuale - crisi dell'educazione: la quale però sarebbe in questo caso il riflesso visibile di una assai più ampia e profonda crisi di valori entro la società considerata.

Dall'uscita di *The World Crisis of Education*, la crisi della scuola non si è certo attenuata, e molti segni tendono a mostrare, entro la pratica sociale dell'educazione, i riflessi di una più radicale crisi delle società. La crisi della scuola potrà attendersi una soluzione solo da mutamenti dell'assetto sociale, e uno importante e urgente è quello di cessare l'identificazione dell'*educazione* nel suo complesso con l'oggetto, fisico e/o concettuale, *scuola*.

Marco Todeschini
Istituto di pedagogia
Università di Milano

segnanti a titolo individuale. D'altra parte, in molti paesi la preoccupazione per il miglioramento della qualità dell'insegnamento sta agendo come una forza di segno opposto, mediante la definizione di obiettivi nazionali precisi e minimali, o la creazione di complesse matrici di valutazione dei risultati accademici. Non è raro che le autorità centrali utilizzino l'assegnazione di una maggiore responsabilità ai consigli dei centri scolastici a scapito delle competenze delle autorità locali, come è accaduto nel Regno Unito e in Svezia.

Privatizzazione

Questo termine può sintetizzare una seconda dimensione di cambiamento nella forma di offerta di servizi pubblici, tra i quali quello relativo all'istruzione. La comune convinzione che lo Stato, già «Stato del benessere», sia incapace di superare i propri limiti attuali per quanto riguarda qualità e quantità di servizi erogati alla cittadinanza, fa sì che ampi settori vedano in un ritorno all'etica del libero mercato una possibile soluzione. Non è pertanto strano che in certi paesi il settore pubblico consideri seriamente di potere ottenere un rinforzo da parte del privato. Intanto, in tutti i paesi comunitari esiste tradizionalmente un sistema educativo privato, al quale le famiglie versano risorse che generalmente sono inversamente proporzionali a quelle dedicate al settore pubblico. In molti di questi paesi, il dualismo tra scuola pubblica e privata è stato al centro di molti dibattiti politici ed è stato l'elemento scatenante di gravi crisi; non pare probabile però che si ritorni ai proclami di guerre scolastiche in Belgio, Francia, Spagna, Italia o Paesi Bassi, con i connotati ideologici che le caratterizzarono a suo tempo. Attualmente si cercano di stimolare migliorie e innovazioni, come quella di garantire un ampio ventaglio di alternative (ideologiche, religiose, metodologiche) in modo che le famiglie possano esercitare un effettivo diritto di libera scelta sulla scuola per i propri figli. Nella pratica, nessuno difende nei paesi industrializzati la privatizzazione del servizio pubblico nel settore educativo, almeno nel senso di un'apertura al puro mercato. Si tratta piuttosto di acquisire i benefici di una gestione privata, soprattutto riguardo alla capacità di misurare i risultati in termini di efficienza e all'adozione di nuove regole del gioco, non esclusa un'ottica di competitività. Non conviene dimenticare al proposito che una delle ragioni più comuni per optare per l'iniziativa non pubblica è semplicemente strumentale: agli occhi delle famiglie europee, il progetto educativo attuato dalle scuole private appare più chiaro e definito, dato che comporta meccanismi di supervisione e di controllo esercitati tanto sugli insegnanti quanto sugli alunni.

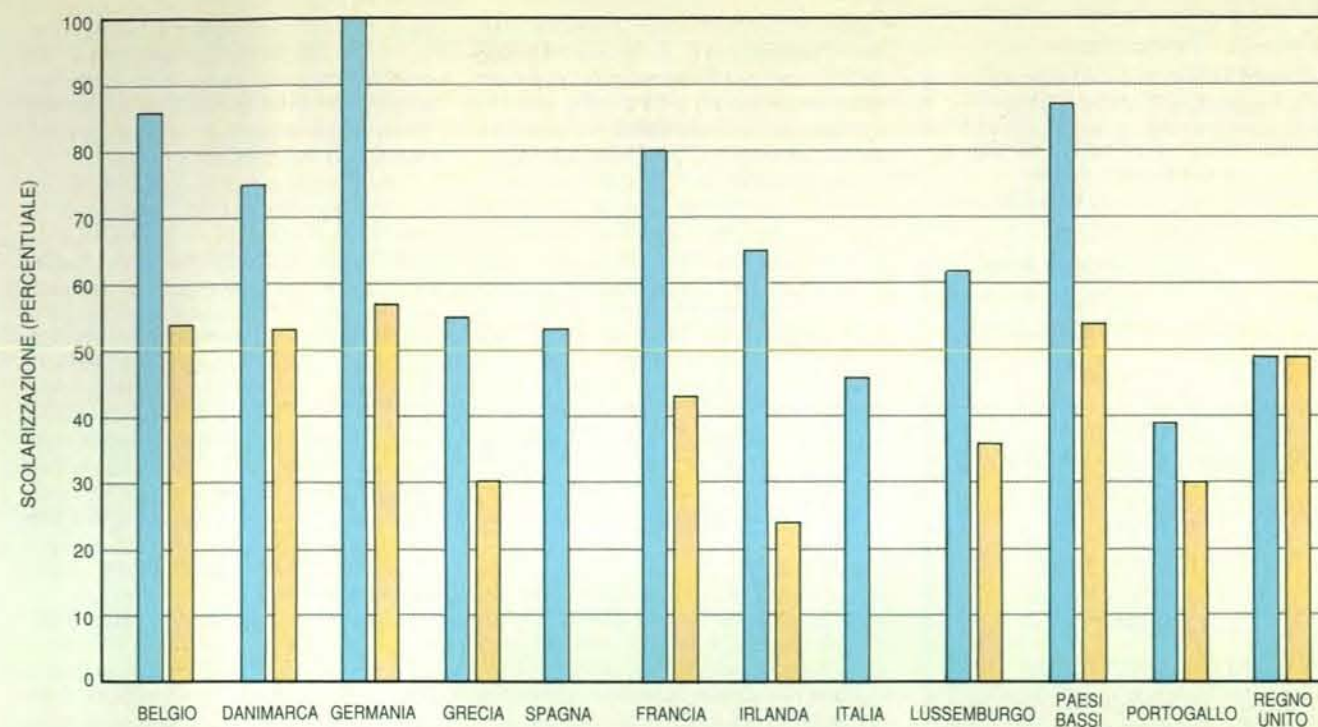
Neppure dal punto di vista finanziario si tratta di una dicotomia radicale. Pagando le tasse, i cittadini già hanno versato la loro quota per ricevere un servizio educativo e, se questo non viene fornito in centri pubblici, quella quota dovrebbe essere rimborsata quantomeno parzialmente. In pratica, lo Stato dovrebbe quindi sovvenzionare l'iniziativa privata.

Studentesse di una scuola secondaria spagnola riprese nel corso di una esercitazione di scienze. (Godo-Foto.)

Per farlo, dispone di due alternative. La prima e più diretta consiste nel finanziamento individuale: nel consegnare cioè al padre di famiglia la quantità di denaro equivalente a ciò che si spende mediamente per alunno nel settore pubblico, e lasciare che siano le famiglie a «comprare», per così dire, l'istruzione che desiderano o di cui hanno bisogno per i propri figli. Sia che si adotti la forma dell'assegno e del buono scolastico, sia che si tratti di una quantità di denaro prestabilita che viene erogata a determinate condizioni, questa alternativa è stata riproposta energicamente, soprattutto nel Regno Unito e negli Stati Uniti. Un'altra forma di finanziamento prevede di sovvenzionare direttamente i centri scolastici, e questa rappresenta l'opzione maggioritaria. Lo Stato esige, come contropartita, un certo numero di garanzie e di controlli, al fine, da un lato, di assicurarsi che i centri privati sovvenzionati rispondano a certi requisiti qualitativi, e dall'altro di vigilare sul buon uso del denaro pubblico.

Un compito che esige maggiore partecipazione

Lo stato di agitazione sociale e politica che si manifestò negli Stati Uniti e in Europa alla fine degli anni sessanta e all'inizio degli anni settanta con la sua scorta di teorie pedagogiche di taglio antiautoritario, se non dichiaratamente rivoluzionario nei confronti del «sistema» educativo, pose in rilievo la necessità di aprire le porte delle scuole al mondo esterno, per allontanare il pericolo di un divorzio tra scuola e vita reale. Una delle conseguenze di questo atteggiamento è stata il progressivo cambiamento dei modelli di direzione e gestione dei centri educativi, per accrescere almeno in apparenza il protagonismo degli insegnanti, delle famiglie e degli stessi studenti a discapito del potere esercitato dallo Stato sia direttamente, mediante piani di studio ed esami di convalida, sia indirettamente, attraverso suoi rappresentanti con compiti di direzione o di ispezione.

Per questa e altre ragioni, negli ultimi anni hanno ricevuto un certo impulso diverse forme di collaborazione delle famiglie nella vita e nella gestione delle scuole. Nel Regno Unito, il Rapporto Taylor del 1977 sottolineava la necessità che ogni scuola avesse una propria «giunta di governo», dimodoché venissero tenuti in considerazione i desideri e i sentimenti delle famiglie e della comunità locale. Lo stesso Rapporto suggeriva che la rappresentanza delle famiglie in queste giunte fosse nella misura di un quarto sul totale dei membri. Una legge del 1980 convertì in norma queste raccomandazioni e un'altra del 1988 incrementò ulteriormente il ruolo delle famiglie, a scapito del potere delle autorità locali. In Francia, la partecipazione delle famiglie al consiglio scolastico è stata del pari assicurata, così come quella del Sindaco e di altri rappresentanti della comunità locale. In Spagna (così come in Italia), la legislazione anteriore al 1985 stabiliva obbligatoriamente che le famiglie fossero rappresentate nei consigli scolastici; in seguito quest'obbligo

L'istogramma riporta i tassi di scolarizzazione dei giovani europei a 17 anni (*in blu*) e a 19 anni di età (*in giallo*) relativamente all'anno 1991. (I dati Eurostat sono incompleti per la Spagna, dove la scuola dell'obbligo arriva a 17 anni, e l'Italia.)

è stato riaffermato, cosicché nei consigli si riuniscono insegnanti, genitori, rappresentanti dell'autorità locale, oltre ad alcuni alunni delle classi superiori. Con poteri diversi di deliberazione, in quasi tutti i paesi europei esistono organi che assicurano una partecipazione analoga.

Il concetto di comunità educante si è esteso anche agli operatori sociali ed economici. Abnormi tassi di disoccupazione giovanile, che giunsero a sfiorare il 50 per cento nei paesi dell'Europa meridionale, mentre si lamentava la carenza di personale qualificato in determinate aree, resero manifesto che, al di là degli effetti diretti della crisi economica, vi era un'altra crisi latente che imponeva un adattamento dei sistemi educativi alla realtà socio-lavorativa, economica e tecnologica. L'euforia da sviluppo degli anni sessanta aveva occultato la dimensione reale del problema, in quanto il «prodotto» dei sistemi educativi veniva assorbito con relativa facilità. Ma quando la domanda si restringe, diventa più selettiva e nel contempo si pongono problemi di ordine quantitativo; si rendono allora evidenti le inadeguatezze qualitative e si mette in discussione il prodotto dei sistemi di formazione.

Il ricorso agli operatori economici oggi come oggi viene considerato imprescindibile, soprattutto ai livelli più prossimi al mercato del lavoro: quello della formazione professionale e quello universitario. Le autorità governative hanno dovuto non solo accettare questa partecipazione a scapito di competenze proprie, ma hanno dovuto incentivarla, anche con un costo economico, generalmente sotto forma di sgravi fiscali.

Il progetto, la realizzazione e la valutazione della formazione professionale non possono ormai escludere in Europa la partecipazione dell'impresa, dei sindacati e delle autorità locali o regionali. L'addestramento professionale all'interno delle imprese sta divenendo in molti paesi una delle componenti più importanti dell'offerta di formazione professionale. In Germania, lo Stato garantisce incentivi alle imprese che aumentano il numero di posti di apprendistato in proporzione ai posti di lavoro. In Francia e in Italia si tende a soddisfare in modo analogo le necessità di formazione del 15 per cento dei giovani di età compresa fra i 16 e i 18 anni. Nei Paesi Bassi ci si attende che il numero di apprendisti dello stesso gruppo di età raddoppi nel prossimo decennio fino a raggiungere il 20 per cento. Nel Regno Unito, senza dubbio, l'importanza della formazione professionale nell'ambito della scuola è andata diminuendo dal 1975, per essere stata trasferita a programmi non accademici. Ma, al di là della formazione, l'obiettivo di assicurare che i contenuti dei programmi di educazione tecnica e professionale si adeguino continuamente alle mutevoli necessità del contesto economico va a carico di organismi quali il Bundesinstitut für Berufsbildungsforschung (BIBB) in Germania, il National Council of Vocational Qualifications (NCVQ) nel Regno Unito e le Commissions Professionelles Consultatives (CPC) in Francia. Tutti questi organismi, e altri analoghi, cercano l'accordo tra amministrazione pubblica e operatori sociali. I loro statuti e i loro poteri reali variano però notevolmente.

Qualità ed efficienza

Gli anni novanta si sono aperti con un quasi ossessivo richiamo alla qualità e all'efficienza dell'attività educativa, con un'enfasi particolare sulla loro valutazione. Un recente rapporto informativo ufficiale sulla situazione dell'educazione negli Stati Uniti reca un titolo alquanto drammatico: *A Nation at Risk*, una nazione in pericolo. Frasi dello stesso tenore si riscontrano anche in un altro studio dell'Accademia Europea su *La scuola nella moderna società europea*.

Ci sono due ragioni, in apparenza oggettive, per questa preoccupazione. Una è il confronto del livello di preparazione scolastica attualmente richiesto con il ricordo che le generazioni adulte hanno dei tempi andati. Due prestigiosi sociologi francesi, Christian Baudelot e Roger Establet, ritengono che la pretesa decadenza delle nostre scuole sia una vecchia idea contestata con dati empirici relativi al caso francese. Secondo i due studiosi, risulta che il livello educativo è cresciuto nel tempo, ma non per tutti e non in uguale misura. Si riscontra un profondo distacco tra un gruppo di testa (molto più numeroso rispetto a qualche generazione fa) e la massa degli inseguitori. In altre parole, le *élite* accademiche hanno oggi un livello di conoscenze sufficientemente elevato, ma non può dirsi lo

Per accordi con
la ZANICHELLI EDITORE S.p.A.
siamo lieti di offrire ai lettori
de LE SCIENZE, a prezzi speciali,
i volumi della collana
NUOVI CLASSICI DELLA SCIENZA
edizione italiana
della "Scientific American Library"

I FOSSILI E LA STORIA DELLA VITA
di George Gaylord Simpson
(L. 38.000)

LA SCOPERTA
DELLE PARTICELLE SUBATOMICHE
di Steven Weinberg
(L. 34.500)

POTENZE DI DIECI
di Philip e Phylis Morrison
(L. 38.000)

LA DIVERSITÀ UMANA
di Richard Lewontin
(L. 34.500)

LA SCIENZA DEL SUONO
di John R. Pierce
(L. 34.500)

IL SECONDO PRINCIPIO
di Peter W. Atkins
(L. 34.500)

L'EREDITÀ DI EINSTEIN
di Julian Schwinger
(L. 36.000)

IL SISTEMA SOLARE
di Roman Smoluchowski
(L. 38.000)

OCCHIO, CERVELLO E VISIONE
di David H. Hubel
(L. 38.000)

FARMACI, DROGHE E CERVELLO
di Solomon H. Snyder
(L. 38.000)

DIMENSIONI E VITA
di Thomas A. McMahon e John Tyler Bonner
(L. 37.000)

STRUTTURE SOTTO SFORZO
di James E. Gordon
(L. 38.000)

DAI QUARK AL COSMO
di Leon M. Lederman e David N. Schramm
(L. 38.000)

MOLECOLE
di Peter W. Atkins
(L. 38.000)

Per approfittare di questa occasione
utilizzare la cedola "ordine per libri"
allegata alla rivista.

stesso degli altri. La domanda che si pone è dunque questa: il sistema educativo ha il compito di concentrarsi nella formazione di alcune *élite* o deve piuttosto raddoppiare i propri sforzi per aumentare la preparazione della maggioranza?

Secondo motivo di preoccupazione, non meno importante, sono i confronti internazionali tra i livelli accademici di studenti appartenenti agli stessi gruppi di età. I dati forniti dall'International Association for the Evaluation of Educational Achievement (un organismo indipendente che conduce da tempo questo tipo di ricerche sulla preparazione matematico-scientifica) mostrano, in effetti, un grande divario per esempio tra gli studenti delle scuole primarie e secondarie del Giappone e della Corea, da una parte, e quelli di Regno Unito e Italia, dall'altra. Circa il 40 per cento delle scuole primarie italiane, e oltre il 60 per cento di quelle britanniche hanno ottenuto qualificazioni più basse rispetto agli standard giapponesi, con voti peggiori nelle discipline scientifiche.

Tuttavia, quasi la stessa differenza esisteva già nel 1970-1971, all'epoca del primo rapporto informativo. E in nessun paese europeo si è osservato il fenomeno della diminuzione nella media delle valutazioni di quasi il 5 per cento, come è avvenuto negli Stati Uniti.

È naturale che questa preoccupazione, unita agli altri fattori economici e sociali qui considerati, dia come risultato una modificazione dei meccanismi di supervisione e controllo del sistema educativo, compito tradizionalmente riservato ai servizi amministrativi di ispezione, che vengono rinforzati con nuovi organismi e nuove prassi. In termini generali, le legislazioni stabiliscono i metodi di valutazione dei sistemi di insegnamento e dei risultati globali (come nel caso della Francia, del Regno Unito e della Svezia) o relativi a ogni livello concreto (Spagna e Paesi Bassi) e obbligano, data la pressione degli organi parlamentari e dell'opinione pubblica, a elaborare regolarmente rapporti informativi che permettano di valutare la situazione.

Curiosamente, una delle conseguenze di questi provvedimenti è solitamente di segno contrario al modello di gestione del sistema educativo dominante. Laddove esiste una tradizione di gestione centralizzata, le istituzioni scolastiche e le autorità locali e regionali vengono ad assumere maggiori responsabilità sul terreno della valutazione; per esempio, in Francia, la parte principale nella valutazione degli insegnanti di scuola secondaria non compete agli ispettori centrali. Nei paesi ove si sono intrapresi drastici processi di decentramento, come in Spagna, o dove già esistevano strutture decentrate, come nel Regno Unito, le procedure di valutazione del sistema educativo conferiscono nuovo potere direttivo allo Stato che si riserva il giudizio finale sulla situazione e l'evoluzione del sistema educativo stesso, dato che le autorità locali e regionali non dispongono delle infrastrutture necessarie per svolgere funzioni analoghe a quelle dello spagnolo Instituto de Evaluación spagnolo o del britannico Schools Examination and Assessment Council.

Le tendenze verso il decentramento e la partecipazione, con la conseguente ripartizione di poteri in materia educativa, si traducono inevitabilmente in cambiamenti nella gestione centrale e, in certa misura, nei compiti che svolge la classe docente (organizzazione del lavoro degli alunni, ripartizione e gestione delle risorse didattiche, rendiconti alle autorità locali e statali). Non deve sorprendere, pertanto, che gli insegnanti avanzino recriminazioni sia per quanto riguarda il trattamento economico, sia per le condizioni in cui operano, e lo facciano a volte anche con scioperi selvaggi, come è accaduto in Grecia, Italia, Spagna, Irlanda e Regno Unito.

Il decentramento ha come effetto positivo quello di accrescere la coscienza professionale degli insegnanti, mentre il fatto di poter prendere parte alle decisioni importanti diminuisce in loro il senso di impotenza e di isolamento.

In conclusione, l'educazione europea dovrà sforzarsi in futuro di coniugare la sua proverbiale enfasi sulle tradizioni culturali con le nuove esigenze tecniche, politiche ed economiche delle società europee. Dobbiamo tuttavia sperare che i valori personali e sociali prevalgano almeno a livello di scuola dell'obbligo, riservando le discussioni sugli aspetti strategici, economici e politici ai livelli di istruzione successivi.

BIBLIOGRAFIA

Science Achievement in Seventeen Countries. A Preliminary Report, International Association for the Evaluation of Educational Achievement (IEA), Pergamon Press, Oxford, 1988.

Education and European Competence, «The European Round Table of Industrialists», ERT, Bruxelles, 1989.

Education and the Economy in a Changing Society, Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico, OCSE, Parigi, 1989.

GARCIA GARRIDO J.L., PEDRÓ F. e VELLOSO A., *La Educacion en Europa: Reformas y Perspectivas de Futuro*, Cincel, Madrid, 1989.

SKILBECK M., *Curriculum Reform. An Overview of Trends*, OCSE, Parigi, 1990.

Structures of the Education and Initial Training Systems in the Member States of the European Community, Eurydice/Cedefop, Eurydice, Bruxelles, 1991.

HUSEN T., TUIJNMAN A. e HALLS W.D., *Schooling in Modern European Society. A Report of the Academia Europea*, Pergamon Press, Oxford, 1992.

Il fenomeno dell'imbianchimento dei coralli

Gli anomali innalzamenti di temperatura dell'acqua marina sembrano la causa principale di questo preoccupante processo che, in molti casi, danneggia irreparabilmente le scogliere coralline dei mari tropicali

di Barbara E. Brown e John C. Ogden

Verso la fine dell'estate del 1987, nelle Isole Vergini, le condizioni ambientali non sembravano discostarsi dalla norma. Immense formazioni di nubi cumuliformi si muovevano verso ovest sospinte dagli alisei, mentre la calma delle acque era solo di tanto in tanto disturbata da burrasche che provenivano dall'Oceano Atlantico e attraversavano il Mare delle Antille nordorientale. L'unica indicazione che vi fosse qualcosa di insolito era la temperatura dell'acqua che, benché non venisse misurata sistematicamente, sembrava più elevata del normale nei pressi delle scogliere coralline poco profonde.

In effetti era accaduto qualcosa di strano. Coralli, gorgonie e spugne, che normalmente sono di colore marrone dorato, verde, rosa o grigio, erano diventati di un bianco purissimo. In certi casi, intere scogliere erano di un candore così accecante da essere visibili a notevole distanza. In altre zone la superficie delle scogliere era tempestata da coralli che avevano perso il loro colore e spiccavano in mezzo a esemplari normali della stessa specie.

Il fenomeno dell'imbianchimento, a volte mortale per i coralli, non era limitato alle Isole Vergini: venne osservato infatti presso numerose stazioni oceanografiche in tutto il Mare delle Antille. E non si trattava neppure del primo caso rilevato: nel 1982 e 1983, in seguito a El Niño (uno sconvolgimento delle consuete condizioni meteorologiche del Pacifico che provoca un temporaneo abbassamento globale della temperatura accompagnato da un riscaldamento locale delle acque del Pacifico orientale), i coralli di certe zone delle Florida Keys divennero bianchi e in seguito morirono, mentre al largo della costa di Panama la mortalità raggiunse il 50 per cento. Ma fu solo fra il 1987 e il 1988, in concomitanza con un altro episodio di El Niño, che l'imbianchimento dei coralli venne osservato comunemente, e da allora è diventato sempre più frequente.

L'associazione di questo fenomeno con El Niño e con temperature dell'acqua marina da due a tre gradi Celsius al di sopra della norma ha indotto alcuni studiosi a supporre che l'imbianchimento dei coralli sia un sintomo del riscaldamento globale. Altri però ritengono che, dal momento che lo studio delle scogliere coralline ha avuto inizio solo pochi decenni fa, è impossibile trarre conclusioni su un evento ancora in gran parte sconosciuto.

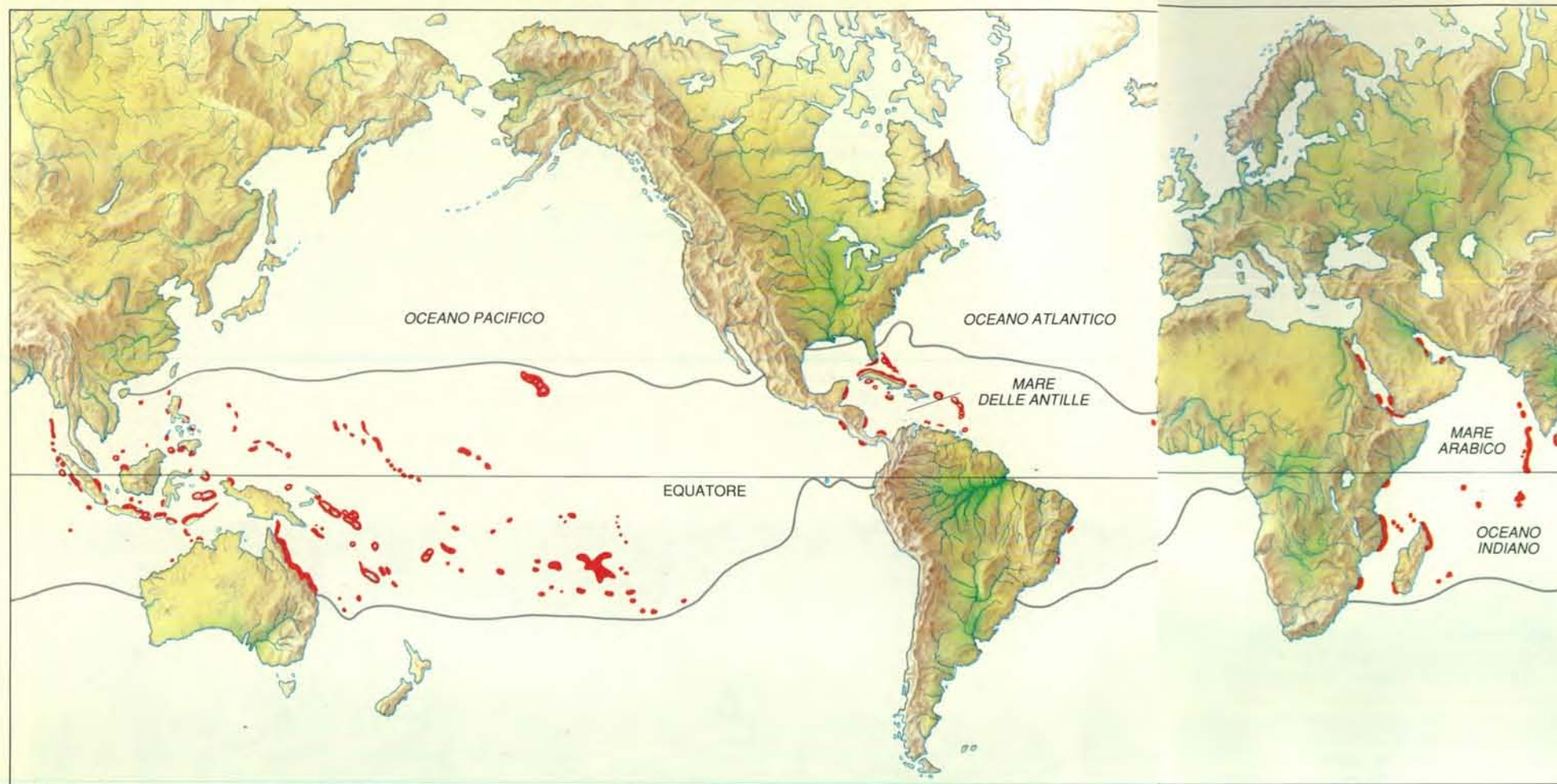
Tuttavia l'imbianchimento colpisce le scogliere coralline in tutto il mondo, e molte rimangono danneggiate in modo irreversibile. Sebbene i fattori che possono causare questo processo siano numerosi (malattie, oscurità eccessiva, aumento della radiazione ultravioletta, sedimentazione, inquinamento e variazioni della salinità) gli episodi dell'ultimo decennio sono apparsi costantemente correlati con temperature anormalmente alte dell'acqua. L'approfondimento delle cause del fenomeno può essere utile per diagnosticare, e possibilmente scongiurare, questo pericolo.

Le scogliere coralline sono ecosistemi tropicali di acque poco profonde, e si trovano in tutto il mondo a latitudini comprese generalmente fra 25 gradi nord e 25 gradi sud. Esse si collocano fra gli ecosistemi marini più produttivi dal punto di vista biologico e, per la varietà di animali e piante che ospitano, vengono spesso paragonate alle foreste pluviali tropicali. La presenza delle scogliere coralline influisce in vario modo anche sulla vita terrestre, in quanto esse formano una barriera lungo le coste a protezione dalle onde oceaniche e costituiscono addirittura la struttura di migliaia di isole. Inoltre esse alimentano le industrie della pesca e del turismo che sono fondamentali per l'economia di molti paesi delle Antille e del Pacifico.

Sebbene i coralli possano apparire come architetture minerali - e alcuni pesino diverse tonnellate e raggiungano un'altezza di 5-10 metri - sono in realtà colonie costituite da migliaia di minuscoli animali chiamati polipi; quasi il 60 per cento dei 220 generi viventi di coralli forma colonie. Ciascun polipo è essenzialmente un cilindro cavo chiuso alla base e munito di una o più corone di tentacoli che circondano l'apertura boccale. Esso assomiglia dunque a un anemone di mare dotato di scheletro: i suoi tessuti esterni molli sono sovrapposti a una struttura dura di carbonato di calcio.

Molte delle splendide colorazioni dei coralli derivano dalla loro associazione simbiotica con alghe unicellulari, chiamate zooxantelle, che sono ospitate nelle cellule spesso incolori del rivestimento intestinale dei polipi; un centimetro quadrato di questo tessuto contiene da uno a due milioni di alghe. Le zooxantelle producono per fotosintesi composti organici che servono da nutrimento per i coralli: alcune specie ricavano anche il 60 per cento del loro fabbisogno nutritivo dai simbionti. La fotosintesi algale accelera inoltre la crescita dello scheletro dei coralli favorendo la produzione di carbonato di calcio. Dal canto loro, i coralli forniscono alle zooxantelle sostanze nutritive essenziali come azoto e fosforo, oltre che ospitalità. L'associazione simbiotica consente alle alghe di ottenere composti che sono rari nelle acque povere di sostanze nutritive delle regioni tropicali (dove le acque superficiali calde si sovrappongono a quelle profonde, più fredde e ricche di sostanze nutritive, senza mescolarsi a esse, tranne che in zone ristrette).

L'imbianchimento dei coralli distrugge il delicato equilibrio fra i simbionti e provoca una perdita di alghe che rende incolori i tessuti dei polipi, tanto che alla fine resta visibile solo lo scheletro bianco di carbonato di calcio. Anche altri organismi che vivono in simbiosi con alghe unicellulari, come anemoni di mare, gorgonie e spugne, possono subire un analogo imbianchimento. Questo processo è in parte naturale: anche coralli o anemoni di mare del tutto sani perdono continuamente alghe, ma in quantità molto contenuta. In condizioni normali, meno dello 0,1 per cento delle zooxantelle dei coralli va perduto nei processi fisiologici di regolazione e di sostituzione dei tessuti. Tuttavia in condizioni avverse, come in seguito a un aumento di temperatura, i coralli liberano un numero più elevato di alghe; per esempio, il trasferimento dalla scogliera al labo-

Solo una parte di questo banco di corallo ha subito imbianchimento; per ora il resto rimane vitale. Sebbene siano diversi i fattori che possono provocare questo fenomeno potenzialmente letale, i casi più recenti appaiono costantemente correlati a temperature dell'acqua di due-quattro gradi Celsius più elevate del normale.

Le scogliere coralline (*in rosso*) si trovano in acque poco profonde nelle zone tropicali di tutto il mondo; la loro distribuzione è delimitata dalle curve in grigio. Oltre a costituire il più produttivo ecosistema marino, esse fungono da barriera che ripara le coste dall'erosione delle onde e forma la base di migliaia di isole.

ratorio può aumentare anche di cinque volte la quantità di zooxantelle espulse.

Il meccanismo di perdita delle alghe rimane in buona parte sconosciuto, e persino definire l'imbianchimento è tutt'altro che agevole. La definizione attuale si basa su misurazioni di laboratorio dell'espulsione di alghe e della perdita dei pigmenti algali. I metodi di laboratorio, però, non sono quasi mai applicabili sul campo, dove si può solo valutare a occhio nudo la perdita di colorazione. Benché questo modo di procedere sia affidabile nei casi di estremo deterioramento, stabilire se colonie di colorazione pallida abbiano subito o meno imbianchimento può essere estremamente arbitrario, data la variabilità naturale.

In certi casi, anche coralli normali soggetti a variazioni adattative del comportamento possono perdere il loro colore. Nel 1989, al Phuket Marine Biological Center in Thailandia, uno di noi (Brown) osservò che certe specie di coralli della zona intertidale - che rimangono esposti all'aria durante la bassa marea - appaiono completamente bianche nelle basse maree primaverili. Ben presto divenne chiaro che questi coralli sono in grado di ritrarre i propri tessuti esterni e di lasciare esposto lo scheletro, per non subire perdita di zooxantelle. Questo comportamento sembra dunque volto a ridurre il disseccamento durante l'esposizione all'aria.

Benché manchi una definizione onnicomprensiva del processo di imbianchimento, sono stati proposti diversi meccanismi per spiegarlo. Nel 1928 Sir Maurice Yonge e A. G. Nicholls, che partecipavano a una spedizione alla Grande Barriera Corallina, furono tra i primi a descrivere l'imbianchimento dei coralli. Essi proposero che le alghe migrassero nei tessuti dei coralli in risposta a stress ambientali per poi essere liberate nella cavità gastrica e infine espulse attraverso la bocca. Quali siano esattamente gli stimoli che provocano il trasporto e l'eliminazione delle alghe è rimasto fino a oggi ignoto.

Una delle varie teorie proposte da Leonard Muscatine dell'Università della California a Los Angeles è che i polipi dei coralli, se sottoposti a stress, producano una minore quantità di sostanze nutritive per le alghe. Secondo questa ipotesi, le zooxantelle potrebbero non risentire direttamente, per esempio, di temperature elevate, ma in queste condizioni il metabolismo dei coralli si abbasserebbe. I rifornimenti di anidride carbonica, azoto e fosforo diverrebbero allora insufficienti, e il conseguente «razionamento» indurrebbe le alghe ad abbandonare la propria dimora.

Inoltre Muscatine, R. Grant Steen e Ove Hoegh-Guldberg, anch'essi dell'Università della California a Los Angeles, hanno studiato la risposta di anemoni di mare e coralli a variazioni di temperatura, luce e salinità. Hanno descritto l'espulsione nella cavità gastrica di alghe contenute nei tessuti e hanno formulato l'ipotesi che i coralli perdano addirittura i loro stessi tessuti insieme alle cellule algali. Ricerche condotte da Suharsono dell'Università di Newcastle upon Tyne confermano questa idea. Egli ha dimostrato che anemoni di mare esposti in laboratorio a temperature elevate perdono sia cellule proprie sia zooxantelle durante l'imbianchimento; in seguito a questo processo i tessuti dell'ospite si assottigliano notevolmente, forse riducendo lo spazio disponibile per le alghe.

L'espulsione diretta di alghe nella cavità gastrica, tuttavia, potrebbe essere solo un fenomeno dovuto alle condizioni estreme indotte in laboratorio. Non è ancora chiaro se le alghe si comportino allo stesso modo nei coralli in situ, ma, in condizioni naturali, è probabile che esse vengano liberate con un gran numero di meccanismi. Tutte le ricerche sperimentali sull'imbianchimento eseguite finora hanno comportato l'esposizione a cambiamenti di temperatura estremi, vale a dire aumenti di sei gradi Celsius o più in 16-72 ore. In natura, gli aumenti di temperatura che inducono imbianchimento sono molto più ridotti, intorno a due gradi Celsius, e possono avvenire in un arco di tempo di alcuni mesi.

Secondo un'altra ipotesi, le alghe sottoposte a stress emetterebbero sostanze tossiche che a loro volta potrebbero danneggiare l'ospite. Le alghe sono in grado di produrre composti dell'ossigeno, i radicali superossido, in concentrazioni nocive per i coralli. (L'ossigeno molecolare è relativamente poco reattivo, mentre il radicale superossido ha una reattività molto elevata.) Di norma l'enzima superossidodismutasi, contenuto nei coralli, inattiva questi radicali.

Tuttavia Michael P. Lesser e colleghi dell'Università del Maine hanno osservato che in certi casi l'imbianchimento dei coralli può essere dovuto a tossicità da ossigeno. Sebbene essi non siano riusciti a misurare direttamente i radicali dell'ossigeno, hanno però seguito la produzione di superossidodismutasi, notando che l'esposizione sia a temperature elevate sia a un livello di radiazione ultravioletta superiore alla norma stimola indipendentemente l'attività enzimatica. I ricercatori hanno concluso che la tossicità da ossigeno possa essere responsabile dell'imbianchimento, in quanto i radicali nocivi passerebbero dalle alghe danneggiate all'ospite.

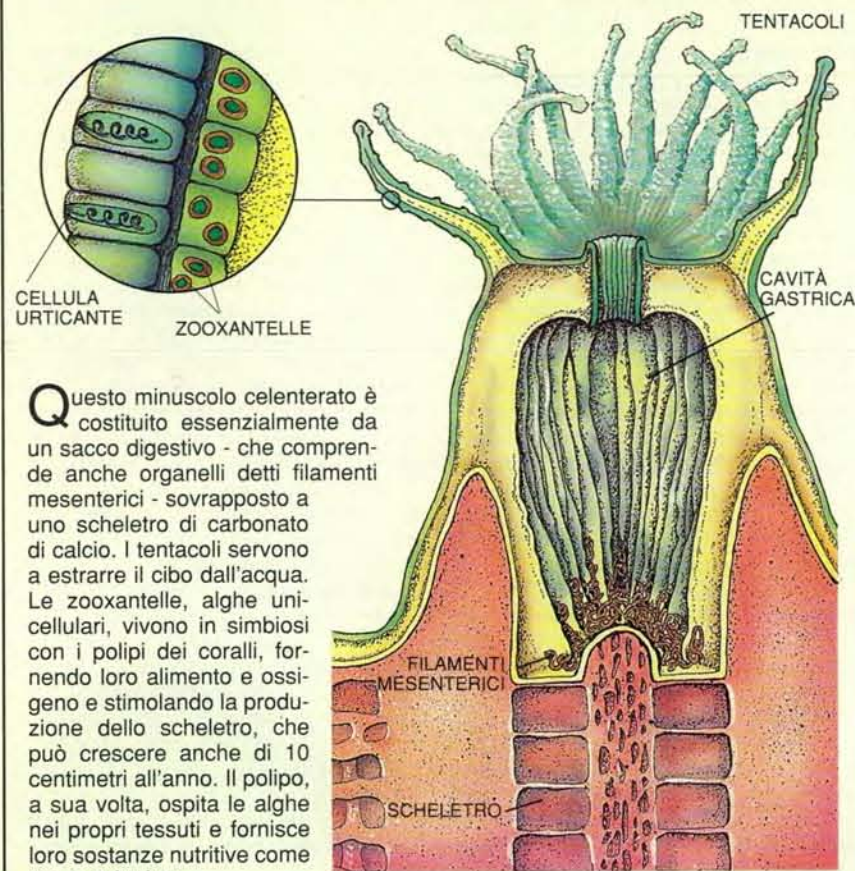
Quella biochimica potrebbe non essere la sola alterazione. David Miller dell'Università di Leeds e alcuni allievi della Brown hanno proposto che, come reazione a cambiamenti ambientali sfavorevoli, possa manifestarsi un'alterazione nell'espressione genica. Verrebbe così indotta la sintesi di proteine da shock termico, composti che in tutti i sistemi viventi soggetti a condizioni avverse servono a proteggere temporaneamente le cellule dai danni dovuti al calore. Miller ha stabilito che la produzione di queste proteine è incrementata negli anemoni di mare sottoposti a shock termico. Inoltre, in anemoni di mare capaci di tollerare un aumento di temperatura, la presenza di queste proteine durante uno shock termico appare correlata a una riduzione dell'imbianchimento.

Anche la variabilità genetica ha un ruolo importante nell'imbianchimento. I fattori ambientali possono influire in modi differenti su specie diverse di alghe o coralli. Naturalmente si potrebbe tentare di prevedere la capacità dei coralli e dei loro simbionti di adattarsi a un aumento della temperatura dell'acqua o a un cambiamento climatico globale identificando le specie a più alto rischio.

Robert K. Trench e Rudolf J. Blank, che allora si trovavano all'Università della California a Santa Barbara, hanno dimostrato che differenti coralli fungono da ospiti per ceppi diversi di alghe. In seguito Rob Rowan e Dennis A. Powers della Stanford University hanno scoperto che le alghe che vivono in una singola specie di coralli sono simili fra loro per costituzione genetica, ma diverse da quelle ospitate in altre specie. Certe alghe possono rivelarsi particolarmente sensibili alla temperatura e possono avere tolleranza variabile a essa. Se questo è vero, le osservazioni di Rowan e Powers aiuterebbero a spiegare perché coralli di specie simili, ma non identiche, esposti a temperature elevate mostrano spesso una differente suscettibilità all'imbianchimento.

In alternativa, la variabilità potrebbe essere dovuta non alle zooxantelle, ma

Organismi che vivono sulle scogliere coralline

L'anatomia di un polipo corallino

Questo minuscolo celenterato è costituito essenzialmente da un sacco digestivo - che comprende anche organelli detti filamenti mesenterici - sovrapposto a uno scheletro di carbonato di calcio. I tentacoli servono a estrarre il cibo dall'acqua. Le zooxantelle, alghe unicellulari, vivono in simbiosi con i polipi dei coralli, fornendo loro alimento e ossigeno e stimolando la produzione dello scheletro, che può crescere anche di 10 centimetri all'anno. Il polipo, a sua volta, ospita le alghe nei propri tessuti e fornisce loro sostanze nutritive come azoto e fosforo.

ai coralli stessi. Lo studio di diverse specie di coralli ha indicato che nell'ambito di una data specie esistono ceppi geneticamente dissimili, i quali potrebbero avere tolleranze diverse ai fattori ambientali. Si spiegherebbe così l'osservazione che a volte una colonia di una particolare specie può essere soggetta a imbianchimento mentre un vicino della medesima specie è ancora sano.

Sembra che i casi di imbianchimento dei coralli rilevati nelle Antille durante gli anni ottanta siano correlati in maniera molto stretta a temperature elevate del mare. Le scogliere coralline hanno bisogno di temperature dell'acqua comprese tra 25 e 29 gradi Celsius, a seconda della posizione geografica. Quando si riporta su un mappamondo la distribuzione della diversità dei coralli, diventa chiaro che questa declina via via che ci si allontana da due centri, situati l'uno nella regione indo-pacifica e l'altro nelle Antille. Le zone della mappa in cui la diversità decresce vistosamente coincidono con quelle in cui la temperatura dell'acqua di mare è più bassa.

Il ristretto intervallo di temperature in cui il corallo può mantenersi sano è molto vicino alla temperatura massima sopportabile: uno o due gradi al di sopra del normale massimo estivo possono essere letali. Paul Jokiel e Stephen Coles dell'Università di Hawaii hanno dimostrato che l'imbianchimento e la morte dei coralli non sono indotti da shock dovuto a temperature in rapida oscillazione, ma sono una risposta a temperature costantemente elevate e a deviazioni significative sopra o sotto la media.

Più di una volta, durante un periodo di 10 mesi a cavallo tra il 1982 e il 1983, un episodio insolitamente intenso di El Niño riscaldò di 3-4 gradi al di sopra della media stagionale le acque del Pacifico orientale. Peter W. Glynn e colleghi dell'Università di Miami registrarono l'evento e i successivi sviluppi in quella regione. Le scogliere coralline andarono soggette a imbianchimento: il 70-90 per cento dei coralli a Panama e in Costa Rica perì dopo alcune settimane e oltre il 95 per cento dei coralli delle Galápagos venne distrutto.

Glynn e Luis D'Croz dell'Università di Panama hanno correlato un'elevata mortalità dei coralli con alte temperature dell'acqua anche in una serie di esperimenti di laboratorio in cui sono state ricostruite le condizioni indotte da El Niño. La principale specie edificatrice di scogliere coralline nel Pacifico orientale, *Pocillopora damicornis*, posta in laboratorio a 32 gradi Celsius, è deperita fino a morire in un arco di tempo uguale a quello rilevato sul campo, a dimostrazione del fatto che gli esperimenti avevano riprodotto le condizioni naturali. Glynn e D'Croz hanno anche proposto che l'elevata temperatura abbia un effetto particolarmente deleterio su quei coralli che, normalmente, sono esposti alla risalita stagionale di acqua profonda e fredda nel Golfo di Panama.

I dati che indicano un riscaldamento dell'acqua di mare nelle Antille durante il 1987 non sono altrettanto certi. Donald K. Atwood e colleghi dell'Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory di Miami hanno esaminato le registrazioni della temperatura alla superficie del mare dal 1932 a oggi, senza rilevare alcun aumento percettibile a lungo termine della temperatura dell'acqua nelle Antille. La temperatura media mensile alla superficie non ha superato i 30,2 gradi Celsius in alcuna delle regioni esaminate; in altri termini, essa è rimasta ben al di sotto dei 32 gradi necessari per indurre imbianchimento negli esperimenti di Glynn.

Atwood ha anche esaminato le mappe tracciate dal National Climate Data Center della National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Queste registrazioni forniscono le temperature medie mensili alla superficie del mare e seguono l'evoluzione di anomalie individuate nei dati da satellite e confermate da misurazioni eseguite da navi. Le mappe mostrano che, nel 1987, la superficie del Mare delle Antille è rimasta generalmente al di sotto dei 30 gradi Celsius. Altri gruppi di ricerca hanno analizzato analoghe registrazioni della temperatura, concludendo che le temperature di alcune aree del Mare delle Antille hanno raggiunto i 31 gradi o più durante il 1990, un altro anno in cui si è verificato l'imbianchimento dei coralli.

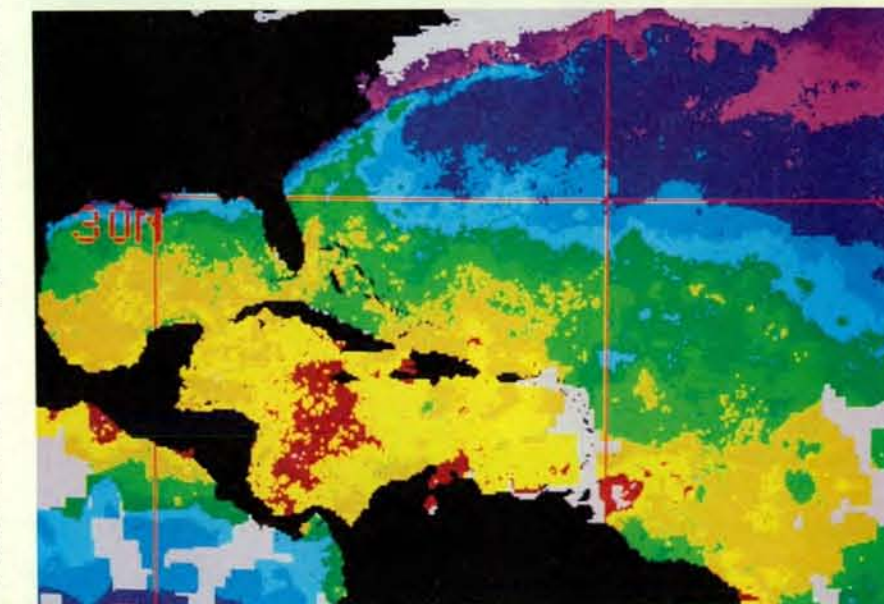
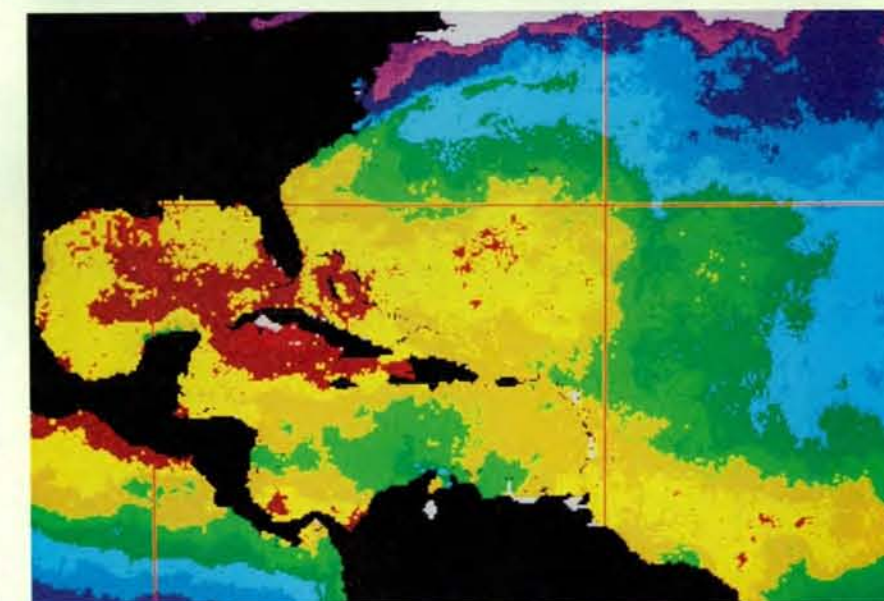
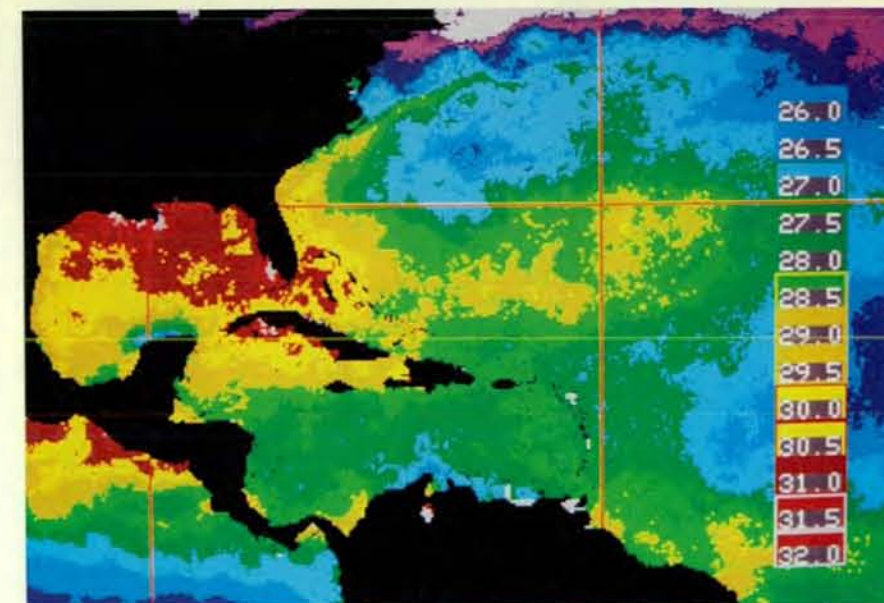
Queste registrazioni, ovviamente, sono soggette a interpretazioni basate sulla scala geografica delle misurazioni da satellite e sull'integrazione di questi dati con misurazioni in situ. Purtroppo non esistono registrazioni a lungo termine della temperatura alla scala di dettaglio che sarebbe necessaria per chiarire la causa del deterioramento dei coralli.

Nel 1987 i resoconti sull'imbianchimento dei coralli hanno coinciso con la crescente preoccupazione per il riscaldamento globale. Non sorprende, dunque, che alcuni siano giunti alla conclusione che le scogliere coralline potessero assolvere un ruolo analogo a quello del canarino in una miniera di carbone, fornendo la prima indicazione di un aumento delle temperature degli oceani a scala globale. Sebbene sia abbastanza chiaro che un'elevata temperatura locale dell'acqua provochi l'imbianchimento dei coralli, per il momento non si può correlare con certezza questo fenomeno al riscaldamento globale. Sotto l'egida della National Science Foundation, della NOAA e della Environmental Protection Agency, esperti di scogliere e climatologi si sono riuniti a Miami nel giugno 1991 per discutere i rapporti fra scogliere coralline e cambiamento climatico globale. I lavori del convegno hanno permesso di stabilire che l'imbianchimento dei coralli era in effetti indicativo di una minaccia per l'ecosistema e sembrava essere associato a un aumento locale di temperatura, ma la scarsità delle conoscenze sulle risposte fisiologiche dei coralli allo stress e alla temperatura, l'inadeguatezza delle registrazioni della temperatura dell'acqua e la mancanza di protocolli standardizzati per gli studi sul campo hanno reso impossibile stabilire se l'imbianchimento rispecchi davvero gli effetti sull'oceano di un cambiamento climatico globale.

Attualmente sono in corso o in programma diversi progetti internazionali, con lo scopo di acquisire ulteriori dati. Per esempio, il Caribbean Coastal Marine Productivity Program, che coordina gli sforzi di oltre 20 istituzioni oceanografiche di 15 paesi, è stato istituito nel 1990 e due anni dopo sono iniziate osservazioni sistematiche delle scogliere coralline. Altri consorzi scientifici sono stati proposti per l'Oceano Pacifico centrale e occidentale.

Quale che sia la sua causa, l'imbianchimento ha implicazioni significative per la struttura e la crescita delle comunità di coralli. Per molti paesi in via di sviluppo le scogliere coralline rappresentano una fonte alimentare importante e una risorsa turistica; l'imbianchimento dei coralli, unito ai danni provocati dall'inquinamento e dalla pesca intensiva, potrebbe rappresentare una grave minaccia per l'economia di molti paesi.

La distruzione dei coralli in un'area vastissima del Pacifico orientale durante El Niño del 1982-1983 ha avuto notevoli ripercussioni biologiche. Prima che si manifestasse l'imbianchimento diffuso, Glynn e colleghi avevano notato che le vaste distese di *Pocillopora* servivano a proteggere le specie di coralli più grandi da *Acanthaster planci*, una vorace stella di mare predatrice. *Acanthaster* non si avventura fra i ciuffi più fitti di coralli perché *Pocillopora* la respinge con le cellule urticanti dei tentacoli. Inoltre diverse specie di gamberetti e granchi che vivono in simbiosi con *Pocillopora* at-

Le oscillazioni della temperatura dell'acqua nel Mare delle Antille durante il 1990 sono state rilevate da satellite. Nei mesi di agosto (*in alto*), settembre (*al centro*) e ottobre (*in basso*) la temperatura in certe zone è arrivata a 31-32 gradi Celsius (*in rosso*); si ritiene che questo insolito fenomeno provochi l'imbianchimento delle scogliere coralline.

I coralli della zona intertidale in Thailandia diventano chiari quando sono esposti all'aria. Al contrario dell'imbianchimento, questo fenomeno è adattativo: i polipi dei coralli ritraggono i tessuti molli durante la bassa marea per evitare il disseccamento, lasciando esposto lo scheletro di carbonato di calcio. Quando l'acqua li risommerge, i polipi si espandono ed estroflettono i tentacoli fino a ricoprire lo scheletro.

taccano le stelle di mare e riescono a scacciarle. L'aumento della mortalità e la diminuzione della fecondità di *Pocillopora*, provocati dal riscaldamento dell'acqua, hanno lasciato i banchi corallini di maggiori dimensioni esposti agli attacchi di *Acanthaster*. Anche i crostacei predatori, che di solito si nutrono del muco ricco di lipidi prodotto da *Pocillopora*, ne hanno risentito: la diminuzione della quantità e del contenuto lipidico del muco, dovuta allo stress termico, ha molto ridotto la loro popolazione.

Il drastico decremento della copertura corallina sulle scogliere di Panama e delle Galápagos nel 1982 e 1983 ha ridotto anche l'area di distribuzione di un corallo urticante del genere *Millepora* e forse ha provocato l'estinzione di un'altra specie del medesimo genere. Glynn e W. H. de Weerdt, ora al Museo zoologico dell'Università di Amsterdam, ipotizzano che queste specie di coralli siano state colpite in modo particolarmente grave per la loro ristretta distribuzione areale e l'estrema sensibilità alla temperatura. Nello stesso periodo si è avuta anche una interruzione quasi completa nell'accumulo di carbonato di calcio nelle scogliere della regione.

Il fatto che prima del 1982 nel Pacifico orientale vi fossero scogliere coralline fiorenti indica che un disastro di questa portata è raro. Glynn ha stimato l'età dei coralli di due specie, che si sono estinte o sono rimaste gravemente danneggiate nelle Galápagos, moltiplicando il raggio delle colonie per il tasso di crescita annuale (circa un centimetro), e ha concluso che episodi di El Niño simili a quello del 1982-1983 non si verificavano in questa zona da almeno 200 anni, se non da 400. Una stima simile è stata fatta per i coralli di Panama. È interessante notare che, anche quando prosperano, le scogliere coralline del Pacifico orientale sono meno sviluppate di quelle del Mare delle Antille. Il loro scarso rigoglio può essere in parte spiegato dagli sbalzi di temperatura relativamente frequenti avvenuti nel corso di migliaia di anni.

Le formazioni coralline delle scogliere di Panama e delle Galápagos hanno subito drastiche modificazioni a causa dell'imbianchimento. Ampie distese di coralli morti sono state colonizzate da alghe bentoniche che, a loro volta, hanno attirato una popolazione sempre crescente di invertebrati erbivori, in particolare ricci di mare. Questi ultimi, per nutrirsi, raschiano la superficie rocciosa della scogliera contribuendo a eroderla.

Glynn e Ian Macintyre della Smithsonian Institution e Gerard M. Wellington dell'Università di Houston hanno stimato il tasso di deposizione e di erosione del carbonato di calcio. Il tasso di erosione attribuibile ai ricci di mare dopo l'episodio di El Niño del 1982-1983 è, da solo, maggiore di quello di accumulo del carbonato di calcio prima del 1983. Questa osservazione indica che, se la popolazione dei coralli non avrà una ripresa, queste scogliere verranno ben presto ridotte a sedimenti carbonatici. Tuttavia, dato che gli erbivori erodono la superficie della scogliera, potrebbero anche intralciare la formazione di nuove colonie di coralli, prolungando il tempo necessario per la ripresa, o addirittura impedendola. Durante El Niño del 1982-1983 si è avuto imbianchimento dei coralli in molti altri luoghi della regione indo-pacifica: Isole della Società, Grande Barriera Corallina, Oceano Indiano occidentale e Indonesia. La Brown e Suharsono hanno rilevato una distruzione anche dell'80-90 per cento della copertura corallina nelle scogliere poco profonde delle isole del Mare di Giava; i coralli più colpiti erano quelli più vicini alla superficie. Cinque anni dopo la copertura corallina era ancora ridotta a circa metà del livello precedente la perturbazione.

L'entità dell'imbianchimento, la tolleranza alle sollecitazioni ambientali e le caratteristiche biologiche dei coralli predominanti determinano se una scogliera può riprendersi o meno dalla distruzione di gran parte dei propri organismi. Altri fattori importanti sono la natura e la successione di altre perturbazioni, come la predazione e il pascolamento. Se l'episodio di imbianchimento è grave o prolungato, spesso i coralli muoiono; se invece è breve, i polipi possono ripristinare i propri simbionti algali e continuare a vivere, ma processi biologici come l'accrescimento e la riproduzione possono essere compromessi.

Dato che solo ora si cominciano a coordinare le osservazioni compiute in diversi siti, l'entità del danno alle scogliere coralline prodotto dall'imbianchimento non è stata ancora valutata su scala globale. Nel 1987 Ernest H. Williams, Jr., dell'Università di Puerto Rico ha raccolto dati sull'imbianchimento pressoché da tutte le zone oceaniche tropicali. Ma finché non avremo standardizzato le osservazioni, l'impatto globale di questo fenomeno rimarrà un mistero.

Se l'incremento di uno o due gradi Celsius previsto per il prossimo mezzo secolo alle latitudini tropicali si verificherà realmente, le conseguenze per le scogliere coralline potrebbero essere disastrose. Non siamo ancora in grado di correlare l'imbianchimento dei coralli a una causa ben definita, ma questo segnale d'allarme non deve assolutamente essere ignorato.

BIBLIOGRAFIA

GLYNN PETER W. (a cura), *Global Ecological Consequences of the El Niño Southern Oscillation 1982-83*, Elsevier, Amsterdam, 1989.

BROWN BARBARA E. (a cura), *Coral Bleaching*, numero speciale di «Coral Reefs», 8, n. 4, aprile 1990.

Workshop on Coral Bleaching, Coral Reef Ecosystems and Global Change: Report of Proceedings, organizzato da Christopher F. D'Elia, Robert W. Buddemeir e Stephen V. Smith, Maryland Sea Grant College, 1991.

La formazione della Via Lattea

A giudicare dalle caratteristiche dell'alone e del disco, eventi diversi avrebbero contribuito alla nascita della nostra galassia: il collasso di una nube di gas, esplosioni stellari e la cattura di frammenti di materia

di Sidney van den Bergh e James E. Hesser

I tentativi di stabilire in che modo la nostra galassia si sia formata e abbia cominciato a evolversi assomigliano allo studio di una antica civiltà sepolta sotto il centro tumultuoso di una città moderna in continua trasformazione. Si tratta di ricostruire, a partire da tracce di fondamenta, qualche coccio e poche ossa, come nascessero, crescessero e morissero i nostri antenati, e in che modo possano avere contribuito a dare origine alla cultura viva. Come gli archeologi, anche gli astronomi devono basarsi su una miriade di piccoli indizi per determinare come la nostra galassia e le sue simili siano nate circa un miliardo di anni dopo il big bang e come abbiano assunto la loro forma attuale. Gli indizi, in questo caso, sono l'età, la distribuzione e la composizione chimica di stelle e ammassi stellari. Tutto ciò si ricava attraverso l'osservazione di parametri quali il colore e la luminosità. Inoltre anche la forma e le caratteristiche fisiche delle altre galassie possono aiutarci indirettamente a capire come sia avvenuta la formazione della nostra.

I dati disponibili inducono a ritenere che la nostra galassia, la Via Lattea, sia nata in seguito al collasso di una grande nube di gas, ma è chiaro che le cose non stanno semplicemente in questi termini. Recenti osservazioni hanno costretto i sostenitori dell'ipotesi di un collasso rapido e semplice a modificare sostanzialmente la propria posizione. Altri studiosi, sulla base di queste stesse novità, ritengono che sia stata la fusione di diversi frammenti di nube a dare origine alla protogalassia, che poi si sarebbe contratta. Altri ancora sviluppano alacremente variazioni sull'uno o sull'altro tema. Tutti i ricercatori, indipendentemente dalle loro convinzioni, riconoscono comunque il contributo che la nascita delle stelle e le esplosioni di supernova hanno dato alla formazione della Via Lattea, e l'influsso che tali fenomeni ancora esercitano sulla sua struttura e il suo destino.

Gran parte delle informazioni di «archeologia stellare» cui si affidano gli astronomi per decifrare l'evoluzione della Galassia si trova in due regioni particolari, l'alone e il disco. L'alone è una regione sferica in lenta rotazione che circonda tutto il resto della Galassia ed è costituita da stelle e ammassi molto vecchi. La regione in rotazione rapida sul piano equatoriale è il disco, fatto di stelle sia giovani sia di età intermedia, e inoltre di gas e polvere interstellare. I bracci curvati a falce che contraddistinguono le galassie a spirale come la Via Lattea si trovano appunto nel disco. Una delle stelle «di mezza età» è il Sole, che è posto a circa 25 000 anni luce dal centro galattico. (Osservando il cielo notturno, il centro galattico si trova in direzione della costellazione del Sagittario.) Il Sole impiega circa 200 milioni di anni per compiere un'orbita intorno al centro.

Il fatto che il Sole faccia parte della Via Lattea è stato scoperto meno di 70 anni fa. A quell'epoca lo svedese Bertil Lindblad e l'olandese Jan H. Oort formularono l'ipotesi che la Via Lattea fosse una galassia appiattita, animata da rotazione differenziale. Alcuni anni dopo, John S. Plaskett e Joseph A. Pearce del Dominion Astrophysical Observatory raccolsero tre decenni di osservazioni sui moti stellari e confermarono la descrizione di Lindblad-Oort.

Oltre al disco e all'alone la Galassia contiene altri due sottosistemi: un rigonfiamento centrale formato prevalentemente da stelle vecchie e - all'interno di questo - un nucleo. Quest'ultimo è quasi sconosciuto a causa delle dense nubi di gas del rigonfiamento che lo nascondono. Il nucleo di alcune galassie a spirale, compresa la Via Lattea, potrebbe contenere un buco nero; quello che forse si trova nel nucleo della nostra galassia non raggiungerebbe comunque la massa dei buchi neri che fungono, a quanto si crede, da nuclei ad alta energia dei quasar.

Tutte e quattro le componenti della Galassia sembrano immerse in una grande aura oscura di materia invisibile. In quasi tutte le galassie a spirale la massa di questa aura invisibile supera di un ordine di grandezza quella di tutte le stelle e il gas visibili del sistema. La natura della materia oscura è attualmente oggetto di aspri dibattiti.

Gli indizi sulla formazione della Via Lattea sono contenuti proprio in queste componenti. Forse l'unica ipotesi che raccoglie un consenso generale è che il rigonfiamento si sia formato per primo, per il collasso di una nube di gas. In fondo il rigonfiamento contiene per lo più stelle vecchie di grande massa. Più problematico risulta invece stabilire quando e come si siano formati il disco e l'alone.

Nel 1958 Oort propose un modello secondo il quale la popolazione delle stelle che si erano formate nell'alone si sarebbe disposta in una struttura appiattita, uno spesso disco poi assottigliatosi. Nel frattempo l'alone era alimentato da nuove stelle condensatesi dall'idrogeno residuo. Altri astronomi preferiscono però una teoria secondo cui le due popolazioni si mantengono distinte, senza confondersi l'una nell'altra: in particolare V. G. Berman e A. A. Suchkov dell'Università statale di Rostov, in Russia, hanno delineato in che modo il disco e l'alone avrebbero potuto svilupparsi mantenendosi separati.

Questi ricercatori ipotizzano che vi sia stata una soluzione di continuità tra la formazione delle stelle dell'alone e del disco. Secondo questo modello, un forte vento alimentato da esplosioni di supernova avrebbe impedito la formazione di stelle nel disco per qualche miliardo di anni e, così facendo, avrebbe espulso una frazione significativa della massa della protogalassia nello spazio intergalattico. Un processo simile potrebbe essere avvenuto nella Grande Nube di Magellano, una delle piccole galassie satelliti della nostra, dove sembra

La Via Lattea è composta da un alone rarefatto, un rigonfiamento centrale e un disco appiattito che contiene i bracci di spirale. Il nucleo è celato dalle stelle e dalle nubi di gas del rigonfiamento. Le stelle del rigonfiamento e dell'alone sono in generale vecchie; quelle del disco, come il Sole, giovani o di mezza età.

che tra la prima ondata di formazione stellare, che diede vita a quegli aggregati di stelle vecchie che sono gli ammassi globulari, e la fase più recente di formazione delle stelle del disco sia trascorso un periodo di quasi 10 miliardi di anni. Altre scoperte corroborano l'ipotesi che le componenti galattiche siano separate. Per esempio M33, una galassia a spirale vicina alla nostra, possiede un alone ma è priva di rigonfiamento centrale, una caratteristica che indica come l'alone non sia semplicemente un'estensione della struttura interna, come molti credevano fino a poco tempo fa.

Nel 1962 venne proposto un modello che funse da paradigma per molti ricercatori. Secondo i suoi autori - Olin J. Eggen, oggi presso i National Optical Astronomical Observatories, Donald Lynden-Bell dell'Università di Cambridge e Allan R. Sandage della Carnegie Institution - la Via Lattea si sarebbe formata dal rapido collasso, durato qualche centinaio di milioni di anni, di una grande nube di gas in rotazione. Via via che la nube si contraeva, la protogalassia ruotava sempre più velocemente, e questa rotazione creò i bracci di spirale che si osservano oggi. All'inizio la nube era formata solo da atomi di idrogeno ed elio prodotti nei primi istanti del big bang, in condizioni di temperatura e pressione estremamente elevate, ma col tempo la galassia cominciò a generare stelle di grande massa a vita breve, che modificarono la composizione della materia galattica. Così le generazioni successive di stelle, compresa quella cui appartiene il Sole, contengono quantità significative di elementi più pesanti dell'elio.

Il modello ottenne un successo notevole, ma osservazioni fatte negli ultimi trent'anni hanno sollevato vari problemi. Per cominciare, si è scoperto che gran parte delle stelle e degli ammassi stellari più vecchi dell'alone si muove di moto retrogrado, cioè ruotano intorno al centro galattico con verso opposto a quello della maggioranza degli altri oggetti. L'esistenza di simili orbite induce a ritenere che la protogalassia fosse notevolmente disomogenea e turbolenta, o che abbia catturato addensamenti gassosi di dimensioni ragguardevoli composti da materia che si muoveva in direzione diversa. In secondo luogo, modelli dinamici più raffinati indicano che la protogalassia non avrebbe comunque subito il collasso in maniera semplice e regolare come previsto dal modello: le parti più dense sarebbero cadute verso il centro assai più velocemente di quelle rarefatte.

Il terzo punto è che la scala dei tempi di formazione delle galassie potrebbe essere stata più lunga di quanto ritengano Eggen e colleghi. Tra le cause del rallentamento potrebbero esservi esplosioni di supernova, venti di plasma che avevano origine da stelle effimere di grande massa e l'emissione di energia proveniente da un nucleo galattico estremamente attivo. La nostra galassia potrebbe anche essersi «rigenerata» assorbendo grandi quantità di gas intergalattico e catturando piccole galassie satelliti ricche di gas.

Vari ricercatori hanno cercato di elaborare scenari compatibili con queste scoperte. Alar Toomre del Massachusetts Institute of Technology, per esempio, ha proposto nel 1977 che gran parte delle galassie si sia formata dalla fusione di numerosi grandi frammenti anziché dal collasso di un'unica nube di gas protogalattica. Dopo essersi fuse in questo modo le nubi di gas sarebbero collassate evolvendosi nella Via Lattea che oggi vediamo. Leonard Searle della Carnegie Institution e Robert J. Zinn della Yale University hanno proposto un quadro un po' diverso, nel quale i frammenti che si aggregano sono più piccoli e numerosi. In base a queste ipotesi, è possibile che i frammenti ancestrali abbiano avuto un'evoluzione chimica particolare: se nei diversi frammenti le stelle avessero cominciato a brillare e le supernove avessero cominciato a esplodere in momenti diversi, allora ciascun frammento originario conserverebbe una «firma» chimica caratteristica. Alcuni studi compiuti ultimamente da uno di noi (van den Bergh) indicano che in effetti tra le popolazioni di stelle dell'alone galattico si osservano davvero differenze simili.

Per determinare l'età delle stelle si usa un diagramma colore-luminosità. Sono qui confrontati i diagrammi per gli ammassi globulari NGC 288 e NGC 362 con i profili al variare dell'età ricavati da modelli dell'evoluzione stellare (*curve in nero*). L'indice di colore, espresso in unità di grandezza stellare, è una misura della differenza tra le intensità di emissione nel blu e nel giallo. In generale più una stella è brillante, più basso è il valore dell'indice, ma la tendenza si inverte per stelle di grandezza superiore a circa 19. Il grafico sembra indicare una differenza di età di circa tre miliardi di anni. I valori di temperatura (inversamente proporzionali all'indice di colore) e di luminosità sono regolati in modo da corrispondere a quelli di NGC 288.

Il dibattito sull'evoluzione della nostra galassia non registrò progressi degni di nota fino agli anni ottanta, quando divenne possibile ottenere immagini di oggetti estremamente deboli con una accuratezza senza precedenti. Si tratta di un passo avanti cruciale perché le teorie fisiche sulla produzione di energia delle stelle - e le stime dell'età e della durata della vita stellare che ne dipendono - sono più attendibili per le stelle appartenenti alla sequenza principale. Queste stelle bruciano idrogeno nel proprio nucleo e in generale si allontanano dalla sequenza principale tanto più in fretta quanto più grande è la loro massa. Purtroppo ciò significa che le uniche stelle dell'alone che si trovano ancora nella sequenza principale sono estremamente piccole e deboli: le più grandi e luminose, che hanno esaurito l'idrogeno e sono uscite dalla sequenza principale, sono diventate invisibili ormai da lunga data. Di solito, per determinare l'età delle stelle, si usano di preferenza quelle degli ammassi perché se ne può stabilire la distanza con precisione molto maggiore che per le stelle isolate.

Il mezzo tecnico che ha permesso di avviare lo studio delle stelle estremamente deboli dell'alone si chiama dispositivo a scorrimento di carica o CCD (da charge-coupled device). Si tratta di un tipo di rivelatore estremamente sensibile che produce immagini per via elettronica convertendo l'intensità della luce in corrente elettrica. I CCD offrono prestazioni molto superiori a quelle delle emulsioni fotografiche pressoché sotto tutti i punti di vista, anche se presentano l'inconveniente di richiedere programmi informatici estremamente raffinati, come quelli realizzati da Peter B. Stetson del Dominion Astrophysical Observatory, per dare i risultati migliori. I CCD hanno però permesso di migliorare di 10 volte la precisione delle misurazioni di colore e di luminosità per le stelle deboli degli ammassi globulari.

Tra i risultati più importanti del lavoro compiuto finora con i CCD vi sono stime più precise dell'età delle stelle. I dati sulle età relative ottenuti tramite queste nuove tecniche hanno rivelato che gli ammassi che per composizione chimica dell'alone sembrano essere stati i primi a formarsi dopo il big bang hanno tutti la stessa età, con un'approssimazione di 500 milioni di anni; gli altri ammassi, invece, presentano valori dell'età più dispersi.

Grazie ai valori così misurati, si è potuto determinare quanto tempo abbia impiegato l'alone per formarsi. Michael J. Bolte, per esempio, che oggi lavora al Lick Observatory, ha misurato accuratamente il colore e la luminosità di varie stelle negli ammassi globulari NGC 288 e NGC 362 (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*). Questi dati, combinati con i modelli numerici dell'evoluzione stellare, indicano che NGC 288 ha circa 15 miliardi di anni, e NGC 362 solo 12. Dato che si tratta di una differenza maggiore del margine di errore delle misurazioni, se ne può dedurre che il collasso dell'alone esterno abbia richiesto probabilmente un tempo maggiore di un ordine di grandezza rispetto a quello previsto dal modello originario a collasso rapido e semplice di Eggen, Lynden-Bell e Sandage.

Può darsi, naturalmente, che i modelli corretti della formazione della nostra galassia siano più di uno. È possibile cioè che quello di Eggen, Lynden-Bell e Sandage sia valido per il rigonfiamento e l'alone interno, più densi, mentre le regioni più rarefatte della Galassia potrebbero essersi sviluppate per fusione di frammenti, secondo gli schemi delineati da Toomre e da Searle e Zinn. Se così fosse, gli ammassi dell'alone interno si sarebbero formati prima di quelli delle regioni esterne meno dense, e ciò spiegherebbe alcune delle differenze di età riscontrate tra ammassi globulari. Per raffinare ulteriormente i modelli potrebbe però essere necessario attendere il miglioramento della qualità delle immagini che si dovrebbe avere dopo le riparazioni allo Hubble Space Telescope.

Non basta tuttavia conoscere l'età dell'alone per descriverne dettagliatamente la formazione; occorre conoscere anche l'età del disco e fare gli opportuni confronti. Mentre per stabilire la prima sono utili gli ammassi globulari, per la seconda si ricorre a un altro tipo di corpo celeste, le nane bianche molto deboli. L'assenza di nane bianche nella regione di disco vicina al Sole pone un limite inferiore all'età del disco: le nane bianche infatti, che non producono più energia radiante, impiegano molto tempo per raffreddarsi, e quindi la loro assenza significa che la popolazione del disco è piuttosto giovane, cioè ha meno di dieci miliardi di anni circa. Si tratta di un valore decisamente inferiore all'età degli ammassi dell'alone, ed è quindi compatibile con l'idea che gran parte del disco galattico si sia sviluppata successivamente all'alone.

Non è ancora chiaro, tuttavia, se sia davvero trascorso un certo intervallo di tempo tra la fine della formazione del-

Il rapporto ossigeno-ferro in funzione dell'abbondanza di ferro per le stelle dell'alone e quelle vecchie del disco indica storie di formazione diverse. Un alto rapporto nelle stelle dell'alone, carenti di metalli, induce a ritenere che queste abbiano inglobato l'ossigeno sintetizzato nelle supernove di tipo Ib, Ic e II, mentre le supernove di tipo Ia avrebbero influito solo sulla composizione delle stelle del disco. Le misurazioni sono di Beatriz Barbuy e Marcia Erdelyi-Mendes dell'Università di São Paulo.

Sembra che gli ammassi globulari, come Messier 5, siano tra gli oggetti più vecchi che si conoscano; per questo offrono elementi essenziali per comprendere il processo di formazione dell'alone, svoltosi circa 15 miliardi di anni fa. Le circa 100 000 stelle dell'ammasso presentano abbondanze simili di elementi pesanti, una circostanza che indica come la nube da cui si svilupparono fosse chimicamente omogenea.

l'alone e l'inizio dello sviluppo del disco primitivo più spesso. Per valutare la durata di questo periodo di transizione si è confrontata l'età delle stelle più vecchie del disco con quella delle più giovani dell'alone. Secondo Pierre Demarque e David B. Guenther di Yale, ed Elizabeth M. Green dell'Università dell'Arizona, gli ammassi stellari più vecchi che si conoscano nel disco, NGC 188 e NGC 6791, hanno un'età di quasi otto miliardi di anni. Stetson e colleghi e Roberto Buonanno dell'Osservatorio astronomico di Roma con i suoi collaboratori hanno esaminato gli ammassi globulari della popolazione dell'alone, stabilendo che i più giovani, Palomar 12 e Ruprecht 106, hanno circa 11 miliardi di anni. Se questa differenza di pochi miliardi di anni è reale, può darsi che gli ammassi globulari giovani costituiscano veramente l'anello mancante tra la popolazione del disco galattico e quella dell'alone.

A tutt'oggi, però, si è riusciti a stimare con precisione l'età relativa solo di pochi ammassi globulari. Finché questa situazione si protrae, si può ipotizzare anche che Palomar 12 e Ruprecht 106 siano in realtà ammassi globulari delle Nubi di Magellano catturati dalla Via Lattea a causa di effetti di marea. Questa spiegazione, proposta da Douglas N. C. Lin dell'Università della California a Santa Cruz e Harvey B. Richer dell'Università della British Columbia, eliminerebbe la necessità di postulare un collasso prolungato. Inoltre la differenza di età tra alone e disco potrebbe essere illusoria: non si può escludere che i metodi di datazione nascondano errori sistematici non rilevati. Ancora, le interazioni gravitazionali con nubi interstellari di grande massa potrebbero aver smembrato gli ammassi più vecchi del disco, risparmiando solo i più giovani.

La determinazione delle età relative dell'alone e del disco rivela numerosi aspetti della serie di fenomeni che ha portato alla formazione della nostra galassia, ma d'altra parte lascia aperto il problema della sua età complessiva. Una risposta a questa domanda fornirebbe un quadro di riferimento assoluto utile anche per indagare meglio la successione degli eventi. La maggior parte degli astronomi che studia gli ammassi stellari tende a indicare per l'età dei più vecchi (e quindi della Galassia stessa) un valore compreso tra 15 e 17 miliardi di anni.

A rafforzare la speranza che queste stime assolute di età siano realistiche vengono le misurazioni dell'abbondanza relativa degli isotopi radioattivi nelle meteoriti: il rapporto tra torio 232 e uranio 235, quello tra uranio 235 e uranio 238 e quello tra uranio 238 e plutonio 244 fungono da orologi cosmici che collocano l'età della Galassia tra 10 e 20 miliardi di anni. Per quanto queste stime siano considerate meno precise di quelle ottenute confrontando osservazioni e modelli delle stelle, la concordanza tra i due valori è incoraggiante.

L'esame della forma delle altre galassie promette di sciogliere almeno in parte i dubbi sull'interpretazione dell'evoluzione della nostra. Più esattamente, lo studio delle altre galassie offre un punto di vista altrimenti inaccessibile a noi che nella Via Lattea abitiamo: una vista dall'esterno. Inoltre le informazioni così ottenute si possono confrontare con quelle relative alla nostra galassia per vedere se i processi che l'hanno creata siano unici.

L'osservazione più immediata che si possa fare sulle galassie è che ce ne sono di varie forme. Nel 1925 Edwin P. Hubble scoprì che le galassie luminose si possono disporre in una successione ordinata secondo la loro conformazione, ellittica, a spirale o irregolare. Da un punto di vista evolutivo le galassie ellittiche sono quelle più progredite: hanno consumato tutto (o quasi) il proprio gas per produrre stelle che hanno un'età compresa probabilmente tra 10 e 15 miliardi di anni. Diversamente da quelle a spirale, le galassie ellittiche non posseggono una struttura a disco. La differenza principale tra le galassie a spirale e quelle irregolari, invece, è che queste ultime sono prive sia dei bracci di spirale sia di un nucleo compatto.

La morfologia delle galassie può essere interpretata in termini di velocità di conversione del gas in stelle. La determinazione della velocità con cui viene consumato il gas sarebbe utile per corroborare le stime dell'età della Via Lattea e le descrizioni della sua storia. Sembra che nelle galassie ellittiche la formazione di stelle sia iniziata in modo rapido ed efficiente circa 15 miliardi di anni fa per poi rallentare bruscamente. Nella maggior parte delle galassie irregolari invece la nascita delle stelle ha avuto luogo molto più lentamente e a un ritmo molto più uniforme, sicché esse conservano tuttora una percentuale significativa del gas originario. La velocità di formazione delle stelle nelle galassie a spirale rappresenta probabilmente una via di mezzo: la formazione delle stelle dev'essere cominciata più lentamente che nelle galassie ellittiche e continua ancora oggi.

Le galassie a spirale si suddividono ulteriormente in tre categorie, Sa, Sb e Sc, che rispecchiano le dimensioni relative del rigonfiamento centrale e il grado di avvolgimento dei bracci. Gli oggetti del tipo Sa hanno il rigonfiamento più grande e i bracci più serrati; contengono inoltre idrogeno neutro e una piccola quantità di stelle blu giovani. Le spirali Sb hanno una popolazione relativamente folta di stelle blu giovani nei bracci, mentre il rigonfiamento centrale, che contiene stelle rosse vecchie, è meno

La classificazione morfologica delle galassie (*in alto*) comprende il tipo ellittico (E), quello a spirale (suddiviso in Sa, Sb e Sc) e quello delle irregolari (Ir). La storia di formazione stellare varia da un tipo all'altro. Nelle galassie ellittiche le stelle si formarono in un'unica ondata iniziale mentre in quelle a spirale la genesi stellare è stata meno energica, ma continua tuttora. In quasi tutte le irregolari la velocità di formazione delle stelle è rimasta probabilmente costante.

I modelli della formazione di galassie si dividono in tre categorie generali. Nel modello di Eggen, Lynden-Bell e Sandage la Via Lattea sarebbe nata dal collasso rapido di una singola protogalassia gassosa (*a*). Il modello di Toomre prevede la fusione di vari grandi agglomerati di gas (*b*). Il modello di Searle-Zinn, simile al precedente, suppone però che i frammenti originari fossero molto più piccoli e numerosi (*c*).

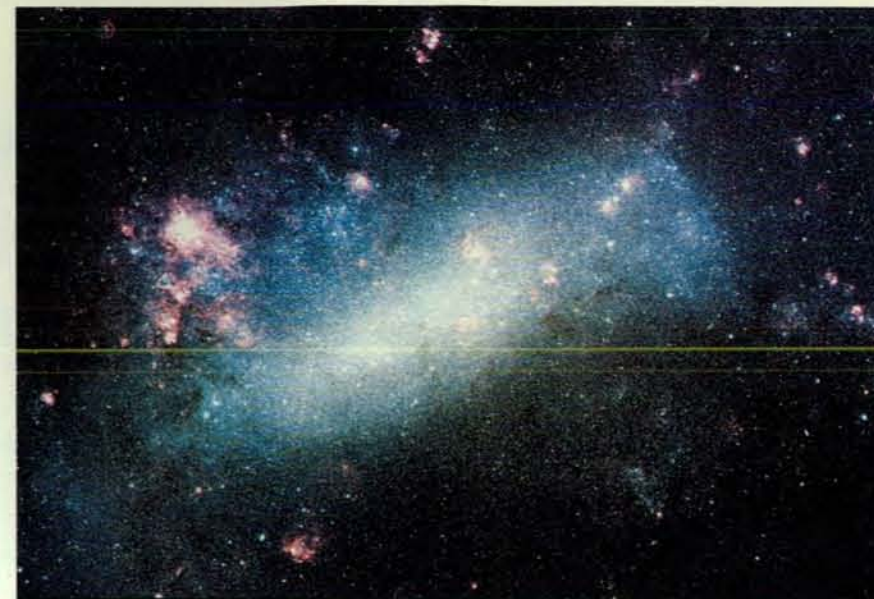
Messier 83 è una tipica galassia a spirale di tipo Sc. La Via Lattea ha probabilmente un aspetto simile, anche se forse i bracci sono avvolti un poco più strettamente.

evidente che nelle Sa. Nelle galassie Sc, infine, l'emissione luminosa proviene principalmente dalle stelle blu giovani dei bracci di spirale: la popolazione del rigonfiamento è poco evidente o assente. La Via Lattea si trova probabilmente in una situazione intermedia tra le spirali Sb e le spirali Sc.

Sembra che le informazioni ottenute dall'osservazione di altre galassie a spirale siano compatibili con i dati relativi alla Via Lattea. Come nella nostra galassia, anche nelle altre le stelle del rigonfiamento centrale sono le più vecchie, il che indica che le regioni interne e più dense della nube di gas hanno subito per prime il collasso. Quasi tutto il gas presente in origine nei pressi del centro è stato quindi trasformato in stelle o espulso dai venti stellari generati dalle supernove.

Esiste un altro tipo di indizi su cui basarsi per capire la genesi della Via Lattea: la composizione chimica delle stelle, che può aiutare a determinare l'età relativa delle varie popolazioni stellari. Secondo i modelli, la composizione chimica di una stella dipende infatti da quando essa si è formata. La differenza deriva dal fatto che le stelle della prima generazione cominciarono a «inquinare» la Galassia con elementi più pesanti dell'elio. Questi elementi pesanti, o «metalli», come li chiamano gli astronomi, erano stati creati nell'interno delle stelle o durante le esplosioni di supernova. Lo studio della composizione delle stelle permette quindi di determinare storie evolutive che possono confermare o confutare le valutazioni dell'età basate su altre fonti.

Le varie specie di stelle e di supernove producono metalli in proporzioni diverse. Si ritiene che le supernove del tipo Ia abbiano generato la maggior parte degli elementi del «picco del ferro» (appartenenti a un gruppo di elementi relativamente abbondanti, di numero atomico vicino a quello del ferro). Si pensa che i progenitori di queste supernove siano sistemi binari le cui componenti hanno entrambe massa pari a poche masse solari. Altri elementi pesanti - tra cui ossigeno, neon, magnesio, silicio e calcio - provengono per la maggior parte da supernove evolutesi a partire da stelle singole o da binarie con componenti di massa grande e vita breve. Queste stelle, la cui massa iniziale è compresa tra 10 e 100 masse solari, terminano violentemente la propria vita come supernove di tipo Ib, Ic o II.

Le stelle formatesi in seguito inglobarono parte di questi elementi pesanti. Per esempio, l'uno o il due per cento circa della massa del Sole è rappresentato da elementi diversi dall'idrogeno e dall'elio. Le stelle del rigonfiamento centrale di una galassia contengono in genere una maggior percentuale di elementi pesanti di quelle della regione esterna del disco o dell'alone. L'abbondanza degli

La Grande Nube di Magellano è una delle due più grandi galassie satelliti della Via Lattea. Attualmente le si sta avvicinando lungo una traiettoria a spirale, e in un futuro remoto colliderà con essa, conferendole una nuova, effimera giovinezza.

elementi pesanti diminuisce progressivamente di un fattore 0,8 per ogni chiloparsec (3300 anni luce circa) di distanza dal centro della Via Lattea. Il 70 per cento circa dei 150 ammassi globulari della Via Lattea presenta un contenuto medio di metalli pari a circa un ventesimo di quello del Sole, e il resto arriva in media a un terzo del valore solare.

Studi approfonditi della composizione stellare rivelano che il rapporto tra ossigeno ed elementi vicini al ferro nel sistema periodico è più grande nelle stelle dell'alone che in quelle del disco ricche di metalli. Questa differenza induce a ritenere che durante la fase dell'evoluzione galattica in cui si formò l'alone gli elementi pesanti fossero prodotti soprattutto dalle supernove di tipo Ib, Ic e II. È strano che le supernove di tipo Ia che generano ferro, alcune delle quali, a quanto si crede, derivano da stelle che vivono poche centinaia di milioni di anni, non abbiano dato un contributo più consistente alla miscela chimica dalla quale si sono formate le stelle dell'alone e alcuni ammassi globulari. Questa circostanza potrebbe significare che l'alone sia collassato molto rapidamente, prima cioè che le supernove di tipo Ia potessero arricchirne il gas con il ferro da esse prodotto.

Questa ipotesi è però in contrasto con la dispersione riscontrata nelle età degli ammassi globulari della Galassia la quale, coprendo un intervallo di quattro miliardi di anni, sarebbe indicativa di un collasso lento dell'alone. Forse venti galattici alimentati dalle supernove spazzarono via nello spazio interagalattico la materia ricca di ferro espulsa dalle supernove del tipo Ia. Questa espulsione selettiva potrebbe essersi verificata se le supernove dei tipi Ib, Ic e II fossero esplose soprattutto all'interno di nubi di gas dense e quelle di tipo Ia in regioni meno dense, più facilmente spazzate da un vento galattico.

Nonostante l'abbondanza di dati, le informazioni sul contenuto di metalli si sono rivelate insufficienti per dirimere la controversia sulla scala dei tempi di formazione del disco e dell'alone. Sandage e il suo collega Gary A. Fouts del Santa Monica College vi leggono indicazioni a favore di un collasso pressoché unitario, mentre John E. Norris e colleghi dell'Australian National Observatory e altri ritengono che la formazione del disco e quella dell'alone siano stati fenomeni abbastanza indipendenti, e ipotizzano inoltre che lo sviluppo della nostra galassia abbia avuto caratteri piuttosto caotici, simili a quelli descritti da Searle e Zinn.

Queste differenze di interpretazione insorgono spesso inevitabilmente in seguito alla selezione di particolari campioni di stelle per un certo studio. Alcune stelle presentano per esempio una composizione chimica simile a quella delle «vere» stelle dell'alone, combinata però a una dinamica che le apparenterebbe piuttosto a una delle sottocomponenti del disco. La composizione chimica insomma, per quanto importante, non basta da sola a risolvere le ambiguità che affliggono l'interpretazione della genesi dell'alone e del disco galattico. Come dice Bernard Pagel dell'Istituto nordico di fisica teorica di Copenaghen: «I cani e i gatti avranno anche la stessa età e la stessa metallicità, ma restano pur sempre cani e gatti».

Oltre a narrare la storia della Via Lattea, il disco e l'alone ne indicano anche la probabile evoluzione futura. È facile calcolare che il gas oggi esistente verrà consumato quasi tutto in alcuni miliardi di anni. Questa valutazione si basa sul tasso di formazione delle stelle nel disco delle altre galassie a spirale e sull'ipotesi che la nascita di stelle continui alla velocità odierna. Esaurito il gas, non si formeranno più stelle e il disco delle galassie a spirale si dileguerà. Alla fine, della galassia non resteranno altro che nane bianche e buchi neri avvolti dalla ipotetica corona di materia oscura.

Vari indizi fanno pensare a un'evoluzione di questo tipo. Nel 1978 Harvey R. Butcher del Laboratorio Kapteyn nei Paesi Bassi e Augustus Oemler, Jr., di Yale hanno scoperto che alcuni ammassi densi di galassie posti a circa sei miliardi di anni luce da noi contengono ancora numerose galassie a spirale; negli ammassi di galassie vicini, invece, queste sono rare o assenti. Questa osservazione indica che il disco di quasi tutte le galassie a spirale degli ammassi densi deve essersi affievolito fino a diventare invisibile negli ultimi sei miliardi di anni. Un'indicazione ancor più immediata della velocità di evoluzione delle galassie deriva dalle cosiddette galassie blu: si tratta di sistemi che producono molto velocemente stelle grandi, e sembrano meno comuni oggi di quanto non fossero solo pochi miliardi di anni fa.

Naturalmente la vita di una galassia a spirale può essere prolungata: l'eventuale caduta di grandi quantità di gas dallo spazio intergalattico potrebbe rimpinguarne le riserve. Il fenomeno può verificarsi se nei dintorni di una galassia si trova una grande nube di gas o un'altra galassia con abbondanti riserve di gas. E le Nubi di Magellano finiranno appunto per cadere nella Via Lattea donandole una nuova, effimera giovinezza. Ma la Galassia non sfuggirà al proprio destino: come le persone e le civiltà, anche le galassie lasciano dietro di sé solo poche vestigia in un universo dinamico, in continua evoluzione.

BIBLIOGRAFIA

MIHALAS DIMITRI e BINNEY JAMES, *Galactic Astronomy: Structure and Kinematics*, W. H. Freeman and Company, 1981.

GILMORE GERARD, KING IVAN R. e VAN DER KRUIT PIETER C., *The Milky Way as a Galaxy*, University Science Books, Mill Valley, California, 1990.

JANES KENNETH (a cura), *The Formation and Evolution of Star Clusters*, Astronomical Society of the Pacific, 1991.

BARBUY B. e RENZINI A.(a cura), *The Stellar Populations of Galaxies*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Paesi Bassi, 1992.

Il ruolo dei carboidrati nel riconoscimento cellulare

La presenza di una gamma vastissima di glicoproteine e glicolipidi sulla superficie cellulare rende possibili eventi diversissimi tra loro come la morfogenesi embrionale, i processi infettivi e le risposte immunitarie

di Nathan Sharon e Halina Lis

Nel 1952, Aaron Moscona dell'Università di Chicago fece alcune importanti osservazioni sulle cellule di embrione di pollo. Incubandole in soluzione enzimatica e rimescolandole delicatamente dopo averle separate, notò che le cellule tendevano a riaggregarsi. Osservò anche che cellule retiniche e cellule epatiche, quando venivano aggregate in un unico ammasso con lo stesso trattamento, si disponevano in modo che le prime migrassero sempre nell'interno della massa. Tre anni dopo, Philip L. Townes e Johannes Holtfreter dell'Università di Rochester eseguirono un esperimento analogo con cellule di embrione di anfibio, che si ridistribuirono in strati tissutali simili a quelli dai quali provenivano. Questi esperimenti e innumerevoli altre osservazioni dimostrano che le cellule hanno una straordinaria capacità di riconoscersi e di reagire di conseguenza. Per esempio, gli spermatozoi possono distinguere le cellule uovo della propria specie da quelle di altre specie, dirigendosi solo verso le prime. Alcuni batteri si insediano preferenzialmente nell'apparato intestinale o urinario; altri propendono per organi diversi.

Non sorprende, allora, che la decodificazione del linguaggio delle interazioni cellulari riscuota notevole interesse in molti settori della biologia e della medicina. Anche se non si è ancora compresa la base chimica della maggior parte dei fenomeni di riconoscimento cellulare, negli ultimi 10 anni si sono fatti notevoli progressi in questa direzione. Le proteine, che mediano la maggior parte delle reazioni chimiche negli organismi viventi, sono presenti anche alla superficie delle cellule e certamente vi svolgono una funzione. Ma dati sempre crescenti indicano anche che, in molti casi, i carboidrati sono i marcatori primari nel riconoscimento cellulare. Le scoperte riguardanti il coinvolgimento di carboidrati specifici nel riconoscimento avranno applicazioni pratiche nella prevenzione e nella cura di molte gravi malattie, tra cui il cancro.

In generale, in biologia è acquisito il fatto che le cellule si riconoscano a vicenda mediante coppie di strutture complementari presenti sulle loro superfici: una struttura su una cellula contiene informazione biologica in codice che viene decifrata dalla corrispondente struttura presente sull'altra cellula. È questa un'estensione dell'ipotesi chiave-serratura, formulata nel 1897 da Emil Fischer che se ne servì per spiegare la specificità delle interazioni tra gli enzimi e i loro substrati. Nel 1900 Paul Ehrlich, un pioniere nel campo dell'immunologia, estese l'ipotesi alle reazioni estremamente specifiche del sistema immunitario e nel 1914 Frank Rattray Lillie dell'Università di Chicago la chiamò in causa per descrivere il riconoscimento tra spermatozoi e cellule uovo.

Già negli anni venti l'ipotesi chiave-serratura era diventata uno degli assunti teorici fondamentali della biologia cellulare, ma ancora per molto tempo la natura e l'identità delle molecole interessate nel riconoscimento cellulare sarebbero rimaste avvolte nel mistero.

Alla maggior parte dei biologi l'idea che tali molecole potessero essere carboidrati sembrava inverosimile. Questa ampia classe di composti consta di monosaccaridi (zuccheri semplici come il glucosio e il fruttosio) e di oligosaccaridi e polisaccaridi, costituiti da monosaccaridi uniti tra loro. Fino alla fine degli anni sessanta, si riteneva che i carboidrati fungessero soltanto da fonti di energia (sotto forma di monosaccaridi e di molecole di riserva come l'amido, che è un polisaccaride) e da materiali strutturali (la cellulosa delle piante e la chitina dell'esoscheletro degli insetti, entrambe polisaccaridi). Le altre due classi principali di molecole biologiche (gli acidi nucleici, che veicolano l'informazione genetica, e le proteine) erano, ovviamente, molto più versatili. In confronto, i carboidrati sembravano modesti comprimari.

Coloro che studiavano i carboidrati furono ulteriormente scoraggiati dall'eccezionale complessità delle strutture di questi composti. Contrariamente ai nucleotidi degli acidi nucleici e agli amminoacidi delle proteine, che possono legarsi tra loro in un solo modo, le unità monosaccaridiche negli oligosaccaridi e nei polisaccaridi possono attaccarsi l'una all'altra in molti punti. Due monosaccaridi identici possono formare 11 disaccaridi differenti, mentre due amminoacidi possono dare origine a un unico dipeptide. Un numero anche piccolo di monosaccaridi può dar luogo a una incredibile varietà di composti, molti dei quali con strutture ramificate. Quattro nucleotidi diversi possono produrre solo 24 tetranucleotidi distinti, ma quattro differenti monosaccaridi possono generare ben 35 560 tetrasaccaridi diversi.

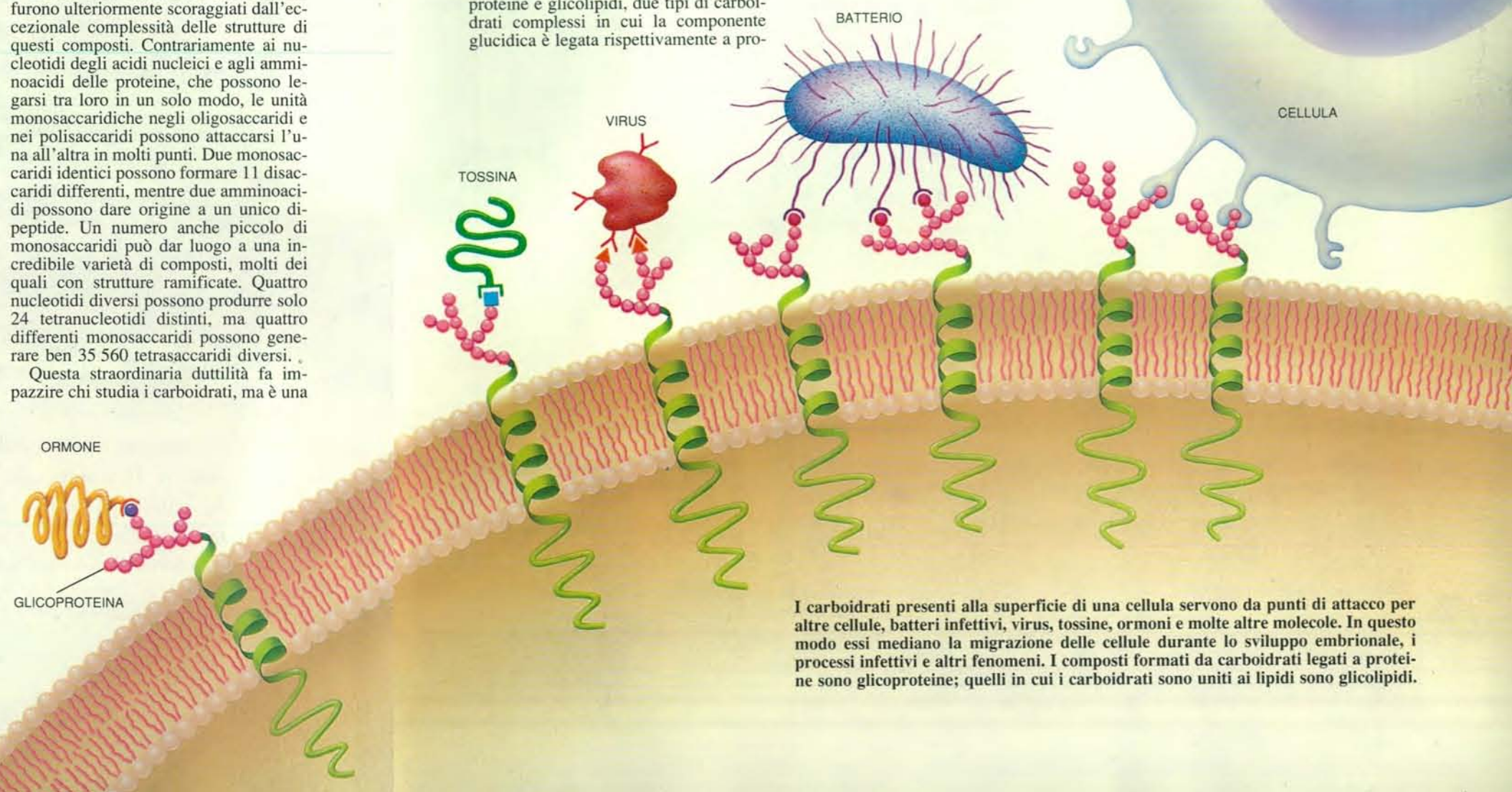
Questa straordinaria duttilità fa impazzire chi studia i carboidrati, ma è una vera manna per le cellule, in quanto rende i polimeri costituiti da carboidrati vettori di informazioni estremamente efficaci. I carboidrati possono trasportare una quantità di informazioni nettamente superiore per unità di peso rispetto agli acidi nucleici o alle proteine. Pertanto i monosaccaridi possono fungere da «vocali» e da «consonanti» in un vocabolario della specificità biologica; le «parole» costruite con essi si distinguono per variazioni nei monosaccaridi, differenze nei legami che li tengono uniti e presenza o assenza di ramificazioni.

Resoconti saltuari sulla capacità dei carboidrati di definire la specificità cominciarono ad apparire abbastanza presto nella letteratura scientifica, ma spesso passarono inosservate. Per esempio, già negli anni cinquanta era noto che l'inoculazione di polisaccaridi poteva stimolare la produzione di anticorpi negli animali. Si sapeva anche che i principali tipi sanguigni del sistema ABO sono determinati da zuccheri presenti sui globuli del sangue e che il virus dell'influenza si lega ai globuli rossi per mezzo di un glucide, l'acido sialico. Ma solo negli anni sessanta i carboidrati hanno avuto il dovuto riconoscimento.

Due importanti sviluppi sono stati la causa di questo cambiamento. In primo luogo ci si è resi conto che tutte le cellule hanno un rivestimento costituito da carboidrati, per la maggior parte glicoproteine e glicolipidi, due tipi di carboidrati complessi in cui la componente glucidica è legata rispettivamente a proteine e a grassi. Sono state finora identificate migliaia di strutture glicoproteiche e glicolipidiche e questa cifra sale quasi quotidianamente. Tale varietà è sicuramente significativa: il repertorio di strutture di superficie della cellula si modifica in maniera caratteristica via via che la cellula si sviluppa, si differenzia o si ammala. I carboidrati presenti sulle cellule neoplastiche sono notevolmente diversi da quelli delle cellule normali.

Un secondo stimolo è venuto dallo studio delle lectine, una classe di proteine che possono combinarsi rapidamente, selettivamente e reversibilmente con i glucidi. Un tempo si pensava che le lectine si trovassero solo nelle piante; in realtà, esse sono ubiquitarie in natura. Compaiono di frequente alla superficie delle cellule, dove sono situate in posizione strategica per combinarsi con i carboidrati presenti sulle cellule vicine. Dimostrano inoltre una estrema specificità: sono in grado di distinguere non solo differenti monosaccaridi, ma anche differenti oligosaccaridi.

Una scoperta cruciale nelle indagini sulla funzione delle interazioni lectine-carboidrati nel riconoscimento cellulare è stata quella di G. Gilbert Ashwell dei National Institutes of Health e di Anatol Morell dell'Albert Einstein College of Medicine. Nel 1968 i due ricercatori hanno rimosso per via enzimatica alcune molecole di acido sialico da certe glicoproteine del plasma sanguigno, che poi hanno iniettato in conigli. Private dell'acido sialico, queste molecole, che normalmente resterebbero in circolo per un certo tempo, sono rapidamente sparite.

Ashwell e Morell hanno trovato che esse andavano a finire nel fegato. La rimozione dell'acido sialico aveva scoper-

I carboidrati presenti alla superficie di una cellula servono da punti di attacco per altre cellule, batteri infettivi, virus, tossine, ormoni e molte altre molecole. In questo modo essi mediano la migrazione delle cellule durante lo sviluppo embrionale, i processi infettivi e altri fenomeni. I composti formati da carboidrati legati a proteine sono glicoproteine; quelli in cui i carboidrati sono uniti ai lipidi sono glicolipidi.

to il galattosio, e i residui di questo zucchero si erano potuti legare a una lectina presente sulle cellule epatiche. In seguito, i due ricercatori hanno trovato che, asportando dalle glicoproteine sia le molecole di acido sialico sia i residui esposti di galattosio, la velocità di eliminazione di queste molecole dal sangue ritornava a valori normali. Essi hanno quindi concluso che le catene laterali dei carboidrati presenti sulle proteine possono fungere da marcatori nell'identificare quali molecole debbano essere rimosse dal circolo e poi degradate.

Proprio come i carboidrati di superficie, le lectine di superficie subiscono cambiamenti che coincidono con stati fisiologici e patologici della cellula. Per esempio, nel 1981 Reuben Lotan e Abraham Raz del Weizmann Institute of Science hanno dimostrato che sia le cellule tumorali di topo sia quelle umane presentano alla superficie una lectina che non si trova sulle cellule normali. In seguito, assieme ad altri ricercatori, hanno dimostrato il coinvolgimento di questa sostanza nello sviluppo di metastasi.

Di recente, il ruolo dei carboidrati di superficie e delle molecole che a essi si legano è stato illustrato chiaramente da studi sulla formazione dell'embrione, compiuti da Senitiroh Hakomori del Fred Hutchinson Cancer Research Center di Seattle e da Ten Feizi del Clinical Research Center di Harrow, in Inghilterra. Operando su embrioni di topo, i due ricercatori hanno dimostrato che, quando un uovo fecondato si divide, i carboidrati presenti sulle cellule embrionali modificano in maniera caratteristica la loro struttura. Uno di questi carboidrati è un trisaccaride noto sia come SSEA-1 (antigene embrionale 1 specifico dello stadio) sia come Le^x ($Lewis^x$): esso compare nello stadio compreso tra le otto e le 16 cellule, non appena un gruppo di cellule sparse si aggrega a formare un embrione che assume la forma di una sfera liscia.

Il gruppo di Hakomori ha dimostrato che un composto solubile contenente molteplici unità di questo trisaccaride inibisce il processo di aggregazione e perturba l'embriogenesi. Carboidrati affini, ma con una struttura differente, non hanno alcun effetto.

I carboidrati con capacità adesive sono, dunque, essenziali per lo sviluppo dell'embrione. Con il procedere delle ricerche la loro funzione in questo processo verrà chiarita nei dettagli; per ora i fenomeni adesivi più noti sono l'attacco dei microbi alle cellule ospiti e l'adesione dei globuli bianchi ai vasi sanguigni. La prima di queste interazioni è studiata da quasi 20 anni e funge da modello per altre forme di riconoscimento cellulare mediato dai carboidrati.

Per provocare la malattia, i virus, i batteri o i protozoi devono poter aderire ad almeno una superficie tissutale di un organismo ospite suscettibile. Gli agenti infettivi privi di questa capacità vengono spazzati via dai potenziali siti di infezione dai normali meccanismi di ripulitura dell'organismo. Per esempio, nel primo tratto dell'apparato digerente i microrganismi possono essere deglutiti e finiranno per essere distrutti dall'acido gastrico. Quelli che penetrano nelle vie urinarie possono venir eliminati con l'urina.

La complessità della struttura dei carboidrati

Carboidrati, acidi nucleici e proteine contengono informazioni biologiche nella loro struttura, ma i primi hanno la massima capacità di veicolare informazioni perché hanno il più ampio potenziale di varietà strutturale. Le molecole di monosaccaridi, che sono le unità costitutive dei carboidrati, possono connettersi tra loro in parecchi punti, formando un'ampia varietà di strutture lineari o ramificate; nell'esempio qui riportato, il carboidrato ramificato è solo una delle molte strutture che possono essere formate a partire da quattro molecole identiche di glucosio. Gli amminoacidi delle proteine, così come i nucleotidi degli acidi nucleici, possono formare solo strutture lineari, il che limita la loro diversità. Il peptide (frammento di proteina) qui riprodotto è l'unico peptide possibile sintetizzato a partire da quattro molecole dell'amminoacido glicina.

I primi indizi sul meccanismo di adesione dei batteri alle cellule sono emersi da una serie di studi pionieristici, avviati negli anni cinquanta da J. P. Duguid della Ninewells Hospital Medical School a Dundee. Duguid ha dimostrato che molti ceppi di *Escherichia coli* (un batterio che vive nell'intestino, ma può anche colonizzare altri tessuti) e di batteri affini aderivano a cellule del rivestimento epiteliale e agli eritrociti (globuli rossi). In presenza di batteri dotati di capacità adesive, questi ultimi si aggregavano: un fenomeno noto come emoagglutinazione. (Si ricorre tuttora abitualmente all'emoagglutinazione come semplice test per provare l'adesione di batteri a cellule animali.) Per scoprire come i batteri si fissavano sulle cellule, Duguid li ha esposti a una vasta gamma di sostanze e ha trovato che soltanto il mannosio e altri monosaccaridi molto simili riuscivano a inibire la emoagglutinazione.

A Duguid si deve anche l'importante osservazione che i ceppi batterici responsabili dell'emoagglutinazione sensibile al mannosio presentano appendici submicroscopiche, simili a peli, sulla superficie cellulare. Queste strutture hanno diametro variabile tra cinque e 10 nanometri e lunghezza di parecchie centinaia di nanometri. Duguid le ha chiamate fimbrie (dal latino *fimbria*, frangia). Quasi contemporaneamente Charles C. Brinton, Jr., dell'Università di Pittsburgh ha descritto le stesse strutture e le ha chiamate pili (dal latino *pilum*). Entrambi i termini sono ancora in uso.

Successivamente, a partire all'incirca dal 1970, Ronald J. Gibbons del Forsyth Dental Center di Boston e collaboratori hanno cominciato a segnalare l'adesione selettiva di batteri a nicchie della cavità orale. Essi hanno osservato che *Actinomyces naeslundii* colonizza sia la mucosa del cavo orale dei lattanti ancora privi di denti sia i denti di bambini di età più avanzata e di adulti. Per contro, *A. viscosus*, un batterio affine, non compare nella bocca finché i denti non spuntano dalle gengive e mostra di avere una preferenza per i denti anziché per l'epitelio della mucosa orale.

Oggi sappiamo che la specificità tissutale dell'adesione batterica è un fenomeno generale. Per esempio *E. coli*, la causa più comune delle infezioni delle vie urinarie, è abbondante nei tessuti circostanti i dotti che collegano i reni e la vescica, mentre si trova raramente nelle vie respiratorie superiori. Invece gli streptococchi del gruppo A, che colonizzano solo le vie respiratorie superiori e la cute, provocano raramente infezioni alle vie urinarie.

I batteri aderiscono selettivamente ai tessuti. Prolungamenti simili a peli, le fimbrie, che sporgono dalla superficie dei batteri si legano esclusivamente a certi carboidrati di superficie. Queste interazioni rendono i tessuti più o meno suscettibili alle infezioni batteriche. Nella microfotografia si vedono batteri a forma di bastoncino, appartenenti alla specie *Escherichia coli*, che hanno invaso l'epitelio delle vie urinarie.

L'adesione batterica varia non soltanto da tessuto a tessuto, ma anche da specie a specie e, talvolta, da individuo a individuo all'interno di una stessa specie, secondo l'età, la costituzione genetica e lo stato di salute. Agli inizi degli anni settanta, R. Sellwood e Richard A. Gibbons e collaboratori dell'Institute for Research on Animal Diseases di Compton hanno esaminato l'infettività del ceppo K88 di *E. coli*, che provoca diarrea nei maialini e causa quindi un danno economico agli allevatori. Essi hanno trovato che i batteri di questo ceppo aderiscono solo alle cellule intestinali dei piccoli di maiale, ma non a quelle dei maiali adulti o degli esseri umani, che non sono suscettibili a questa infezione. Mutanti batterici che avevano perduto la capacità di aderire alle cellule intestinali si sono dimostrati incapaci di infettare gli animali.

Come ha dimostrato il gruppo di Gibbons, alcuni maialini avevano una resistenza genetica nei riguardi del ceppo K88: anche batteri potenzialmente virulenti non riuscivano ad aderire alle loro cellule intestinali. Selezionando per la riproduzione maiali geneticamente immuni, gli allevatori sono riusciti a ottenere una progenie resistente al K88.

Il microrganismo responsabile della gonorrea, *Neisseria gonorrhoeae*, costituisce un altro esempio di specificità di specie e tissutale. Esso aderisce alle cellule degli epiteli genitale e orale dell'uomo, ma non a quelle di altri organi o di altre specie animali. Questo fatto spiega perché l'uomo sia l'ospite esclusivo di *N. gonorrhoeae* e perché gli altri animali non contraggano la gonorrea.

Un forte impulso allo studio dell'adesione batterica è stato dato da una proposta avanzata nel 1977 da Itzhak Ofek dell'Università di Tel Aviv, da David Mirelman del nostro dipartimento e da uno di noi (Sharon). Abbiamo suggerito che l'adesione batterica alle cellule ospiti sia mediata da lectine presenti sulla superficie cellulare dei batteri, le quali si legano a zuccheri complementari presenti sulle cellule ospiti. L'ipotesi è risultata di validità generale. Ricerche compiute in molti laboratori hanno dimostrato che i batteri producono lectine specifiche per certi carboidrati e dipendono da esse per aderire ai tessuti di un ospite come primo passo nel processo di infezione.

Le lectine batteriche sono già state al centro di numerosi studi, anche se restano da chiarire molti aspetti del loro funzionamento. Quelle meglio caratterizzate sono le fimbrie di tipo 1 di *E. coli*, che si legano preferenzialmente alle glicoproteine di superficie contenenti mannosio. Altri ricercatori che hanno lavorato su *E. coli* nell'ultimo decennio (in primo luogo Catharina Svanborg-Edén e collaboratori dell'Università di Göte-

borg) hanno descritto nei particolari le fimbrie P, le quali interagiscono in modo specifico con la sostanza del gruppo sanguigno P, un glicolipide estremamente comune contenente il disaccaride galabiosio. Gruppi di ricercatori guidati da Karl-Anders Karlsson dell'Università di Göteborg e Victor Ginsburg dei National Institutes of Health hanno riassunto le specificità di lectine appartenenti a numerose altre specie e ceppi batterici.

Questi studi hanno dimostrato che i batteri non si legano solo alle estremità dei carboidrati di superficie, ma possono talvolta legarsi a carboidrati localizzati all'interno della struttura. Inoltre differenti batteri possono formare legami con parti diverse dello stesso carboidrato. Occasionalmente su una data cellula può essere esposta solo una faccia di un oligosaccaride, e di conseguenza questa cellula si legherà a batteri di un tipo e non ad altri. Pertanto la capacità dei carboidrati della superficie cellulare di fungere da siti di attacco dipende non solo dalla presenza di questi carboidrati, ma anche dalla loro accessibilità e dal modo in cui si presentano.

Cospicue prove sperimentali sostengono oggi la conclusione che sia il legame dei batteri ai carboidrati presenti sulla superficie delle cellule ospiti a dare l'avvio all'infezione. Per esempio, le cellule uroepiteliali di quei rari individui che sono privi della sostanza del gruppo sanguigno P non si legano agli esemplari di *E. coli* che hanno fimbrie P. Tali individui sono molto meno suscettibili a infezioni da parte di questi batteri di quanto lo sia il resto della popolazione. Tuttavia, alcuni esperimenti hanno mostrato che i batteri in questione possono legarsi a cellule epiteliali preventivamente rivestite di un glicolipide sintetico contenente galabiosio.

Si è anche osservato che le cellule intestinali dei maialini resistenti al ceppo K88 di *E. coli*, che provoca diarrea, sono prive del grosso carboidrato a cui questi batteri si legano. Anche se non si conosce ancora la struttura esatta di questa molecola, si sa che essa è presente nei piccoli di maiale suscettibili all'infezione, mentre è assente negli adulti. Ciò spiega perché i batteri non attacchino e colonizzino l'intestino dei maiali adulti, ma infettino solo esemplari giovani.

Un altro caso interessante è quello del ceppo K99 di *E. coli*. Questo ceppo, come il K88, provoca diarrea nel bestiame, ma non nell'uomo. Tuttavia, esso è meno specifico del K88, in quanto, oltre ai piccoli di maiale, infetta anche vitelli e agnelli. Si lega in modo specifico a un insolito glicolipide che contiene acido N-glicoloilneuramminico (un tipo speciale di acido sialico) legato al lattosilcerammide. Questo glicolipide, presente nei giovani maiali, nei vitelli e negli agnelli, manca nelle cellule dei maiali adulti e dell'uomo, le quali contengono invece acido N-acetilneuramminico, un analogo dell'acido sialico, che non si lega. La piccola differenza tra due carboidrati estremamente simili (sostituzione di un gruppo acetilico con un gruppo glicoloilico) viene facilmente rilevata dai batteri e spiega la loro specificità.

Un'ulteriore conferma delle conclusioni riportate si è avuta di recente in esperimenti compiuti su due lectine fimbriche di *E. coli*, che infettano le vie urinarie dell'uomo e del cane. Entrambe riconoscono il galabiosio, ma una si lega soltanto alle cellule epiteliali dell'apparato urinario dell'uomo, mentre l'altra si lega solo alle cellule del cane. I glicolipidi contenenti galabiosio presenti sulla superficie delle cellule sono esposti in maniera diversa, e questo spiega l'elevata specificità nei riguardi dell'ospite.

Dato che l'adesione dei batteri ha una funzione così critica nell'infezione, si sta considerando seriamente l'impiego di carboidrati nella prevenzione e nella terapia. I carboidrati che inibiscono selettivamente l'adesione potrebbero fungere da esche molecolari, intercettando i batteri patogeni prima che raggiungano i tessuti bersaglio. Le infezioni delle vie urinarie hanno suscitato attenzione in quanto, per frequenza, sono seconde solo alle infezioni delle vie respiratorie.

Nel 1979, in collaborazione con Ofek, Moshe Aronson dell'Università di Tel Aviv e Mirelman, abbiamo inoculato un ceppo di *E. coli* specifico per il mannosio nella vescica urinaria di topi. Ad alcuni soggetti abbiamo somministrato anche metil-alfamannoside, un carboidrato che in provetta inibiva l'adesione dei batteri alle cellule epiteliali. La sua presenza ha ridotto la colonizzazione delle vie urinarie da parte di *E. coli*.

La Svanborg-Edén ha eseguito esperimenti analoghi con un ceppo di *E. coli* dotato di fimbrie P e in grado di infettare i reni del topo, incubando questi batteri in soluzioni di globotetraosio, un carboidrato presente nel glicolipide delle cellule renali. Quando poi li ha iniettati in topi, la loro persistenza nei reni è stata inferiore a quella dei batteri non trattati. James A. Roberts della Tulane University ha ottenuto risultati analoghi in esperimenti su scimmie: l'incubazione di *E. coli* dotata di fimbrie P con un carboidrato simile al galabiosio ha ritardato in misura significativa la comparsa di infezioni delle vie urinarie.

Anche i glicopeptidi possono interferire con il legame dei batteri ai tessuti. Nel 1990 Michelle Mouricout dell'Università di Limoges e collaboratori hanno dimostrato che iniezioni di glicopeptidi prelevati dal plasma sanguigno di vacca possono proteggere i vitelli neonati dall'inoculazione di dosi letali di *E. coli*. I glicopeptidi, che contengono carboidrati per i quali i batteri hanno affinità, riducono l'adesione dei batteri alle cellule intestinali degli animali trattati.

In effetti, per interferire con l'adesione dei batteri non è neppure necessario usare un carboidrato: può bastare qualsiasi agente che si leghi in maniera competitiva o alla lectina batterica o al carboidrato di superficie della cellula ospite. Per esempio, Edwin H. Beachey e collaboratori del Veterans Administration Medical Center e dell'Università del Tennessee a Memphis si sono serviti di anticorpi contro il mannosio per impedire a certi ceppi di *E. coli* specifici per il mannosio di infettare i topi. Gli anticorpi si legano al mannosio presente sulla superficie delle cellule, bloccando i siti di attacco per i batteri.

Questi esperimenti mostrano chiaramente l'utilità delle terapie antiadesive per combattere le malattie microbiche e la loro applicazione all'uomo è oggi al centro di intense ricerche. Ulteriori studi sui carboidrati presenti sulle cellule ospiti e sulle lectine batteriche dovrebbero consentire la progettazione di migliori inibitori dell'adesione. Riguardo a questo procedimento un punto è certo: poiché differenti agenti infettivi (perfino differenti batteri all'interno dello stesso ceppo) possono avere una vasta gamma di specificità per i carboidrati, per prevenire o curare malattie sarà indubbiamente necessario un cocktail di inibitori.

Le interazioni cellulari mediate dai carboidrati non si limitano a fenomeni patologici; esse hanno anche un'importanza cruciale per l'attività del sistema immunitario che garantisce buona salute all'organismo. Il sistema immunitario consta di molte componenti, ma i suoi elementi più attivi sono i leucociti, i quali includono tutta una serie di cellule diverse - linfociti, monociti e neutrofili - che agiscono congiuntamente per eliminare batteri e altri intrusi e per mediare la reazione infiammatoria nei tessuti lesi. Tutte queste cellule circolano nel sangue, ma svolgono le loro principali funzioni negli spazi extravascolari.

Il quadro che emerge dalla ricerca è il seguente: l'endotelio, cioè il rivestimento interno dei vasi sanguigni, intrappola attivamente i globuli bianchi del sangue e li dirige dove sono necessari. Questo processo esige un riconoscimento estremamente preciso tra i leucociti in circolo e le cellule endoteliali.

Sembra che tale riconoscimento sia mediato da una famiglia di lectine affini per struttura. Poiché questo settore della ricerca è così nuovo e differenti laboratori spesso identificano simultaneamente le stesse molecole che partecipano al processo di adesione, la nomenclatura è ancora un poco caotica. La maggior parte dei ricercatori le chiama selectine, dato che mediano il contatto selettivo tra cellule; un altro nome in voga è LEC-CAM, acronimo di *leukocyte-cell adhesion molecules*.

Le selectine sono proteine composite estremamente asimmetriche, con una insolita struttura a mosaico. Consistono in tre tipi di dominî funzionali: un dominio ancora la selectina alla membrana cellulare; un secondo costituisce la maggior parte della molecola; il terzo, localizzato all'estremità extracellulare della molecola, assomiglia strutturalmente alle lectine animali che funzionano solo in presenza di ioni calcio. L'unione dei ligandi carboidratici a questo dominio ha un'importanza cruciale per la funzione delle selectine nelle interazioni tra cellule.

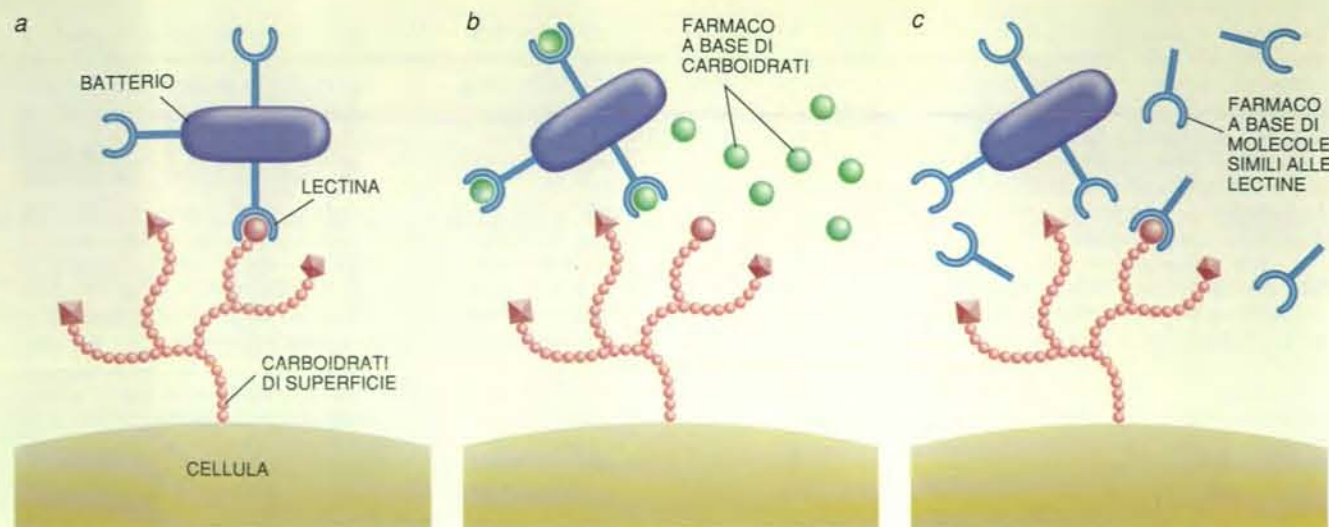
Circa 10 anni fa Eugene C. Butcher e Irving L. Weissman della Stanford University posero le basi delle nostre attuali conoscenze su come le selectine (che erano allora ignote) dirigano il traffico dei linfociti. Tra i leucociti, i linfociti svolgono una funzione unica, nel senso che pattugliano di continuo tutto l'organismo alla ricerca di antigeni estranei (cioè di molecole significative sotto il profilo immunologico) provenienti da batteri, virus e simili. A questo scopo essi abbandonano i vasi sanguigni e migrano nei linfonodi, nelle tonsille, nelle adenoidi, nelle placche intestinali di Peyer o in altri organi linfatici secondari. Differenti linfociti migrano selettivamente verso particolari organi. Per uscire dal circolo sanguigno, devono dapprima fissarsi a vasi sanguigni submicroscopici specializzati, il cui diametro è inferiore a 30 micrometri: le venule endoteliali maggiori.

Con una tecnica messa a punto da Hugh B. Stamper, Jr., e da Judith J. Woodruff della State University of New York a Brooklyn, Butcher e Weissman hanno osservato che la specificità di migrazione dei linfociti di topo è dettata dalla loro interazione selettiva con le venule endoteliali maggiori presenti negli organi bersaglio. Essi hanno quindi prodotto un anticorpo monoclonale, MEL-14, che si è unito soltanto ai linfociti di topo diretti verso i linfonodi periferici. Su sezioni di tessuto, l'anticorpo ha bloccato l'attacco dei linfociti alle venule endoteliali maggiori di quel tessuto, ma non di altri organi linfatici. Iniettato nei topi, MEL-14 ha inibito la migrazione dei linfociti nei linfonodi periferici.

Butcher e Weissman sono andati oltre, dimostrando che il loro anticorpo si legava a una singola glicoproteina, oggi chiamata selectina L, sulla membrana del linfocita. Essendo responsabile del legame specifico dei linfociti alle venule endoteliali maggiori, essa è denominata anche recettore in grado di guidare l'aggancio (*homing receptor*).

Se le venule endoteliali maggiori dei linfonodi vengono messe in presenza di

LINFOCITA CON DIVERSI RECETTORI CHE GUIDANO L'AGGANCIO
LINFOCITA CHE FUORIESCE DALLA VENULA
RECETTORE CHE GUIDA L'AGGANCIO (SELECTINA L)
LINFOCITA
CARBOIDRATI
PLACCA DI PEYER
CELLULA ENDOTELIALE
LINFONODO PERIFERICO

I linfociti difendono l'organismo dalle infezioni abbandonando il circolo sanguigno e migrando nei tessuti. La prima fase comporta l'adesione selettiva tra linfociti e pareti di certi vasi sanguigni, le venule endoteliali maggiori (*nella fotografia*). L'adesione dipende da molecole di superficie, le selectine, che si legano ai carboidrati presenti su altre cellule. Le selectine L dei linfociti, che mediano la fase di aggancio, stabiliscono su quali cellule endoteliali aderirà un linfocita: per esempio alcuni si insediano solo nei linfonodi periferici o nelle placche di Peyer dell'intestino. I linfociti possono in seguito fuoriuscire dall'endotelio e migrare in altri tessuti.

Una strategia per combattere le infezioni consiste nel bloccare l'aggancio dei batteri. Come preludio all'infezione, le proteine di superficie dei batteri, le lectine, si attaccano ai carboidrati di superficie delle cellule di ospiti suscettibili (*a*). Farmaci contenenti analoghi carboidrati potrebbero impedire l'aggancio legandosi alle lectine (*b*). In alternativa, farmaci costituiti da molecole simili alle lectine potrebbero avere lo stesso effetto occupando, senza nuocere, i siti di legame sui carboidrati (*c*).

soluzioni di selectina L, i linfociti non riescono a legarsi a esse in quanto le molecole di selectina L occupano tutti i potenziali siti di attacco sulle cellule endoteliali. Per contro, come ha dimostrato Steven D. Rosen dell'Università della California a San Francisco, anche certi carboidrati di piccole dimensioni e polisaccaridi più grossi possono bloccare le interazioni tra linfociti e venule endoteliali. In questi casi sono i carboidrati a legarsi alla selectina L.

Nel 1989, esperimenti condotti separatamente da Weissman e da Laurence A. Lasky della Genentech di South San Francisco, in collaborazione con Rosen, hanno dimostrato in maniera decisiva che il recettore in grado di guidare l'aggancio fa da mediatore nell'adesione dei linfociti alle cellule endoteliali. La struttura del carboidrato endoteliale a cui si lega non è ancora nota.

Contrariamente al suddetto recettore, le due altre selectine note si trovano principalmente sulle cellule endoteliali e solo quando esse attraggono attivamente i leucociti. Una di queste, la selectina E (ELAM-1), è stata scoperta nel 1987 da Michael P. Bevilacqua della Harvard Medical School. Il terzo membro del gruppo, la selectina P (in precedenza conosciuta come GMP-140 e PADGEM), è stata scoperta indipendentemente, circa due anni più tardi, da Rodger P. McEver della Oklahoma Medical Research Foundation e da Bruce e Barbara Furie della School of Medicine della Tufts University.

La ricerca ha chiarito in che modo i tessuti utilizzino le selectine per indirizzare i globuli bianchi del sangue dove sono necessari. Quando un tessuto viene infettato, secerne come difesa le citochine, proteine come l'interleuchina 1 e il fattore di necrosi tumorale. Le citochine stimolano le cellule endoteliali delle venule a esprimere sulle loro superfici le selectine P ed E. I globuli bianchi di passaggio aderiscono a queste molecole che sporgono perché il loro rivestimento costituito da carboidrati contiene strutture complementari. Una volta attaccato alla parete di una venula, un leucocita può abbandonare il circolo sanguigno

Gli effetti selettivi dei carboidrati sui batteri sono mostrati in queste microfotografie. Questi *Escherichia coli* hanno una lectina specifica per il glicolipide P. Batteri incubati nel mannosio possono ancora attaccarsi al tessuto epiteliale (*a sinistra*). Quando un costituente del glicolipide P si lega alla lectina, il batterio non è più in grado di aderire (*qui sopra*).

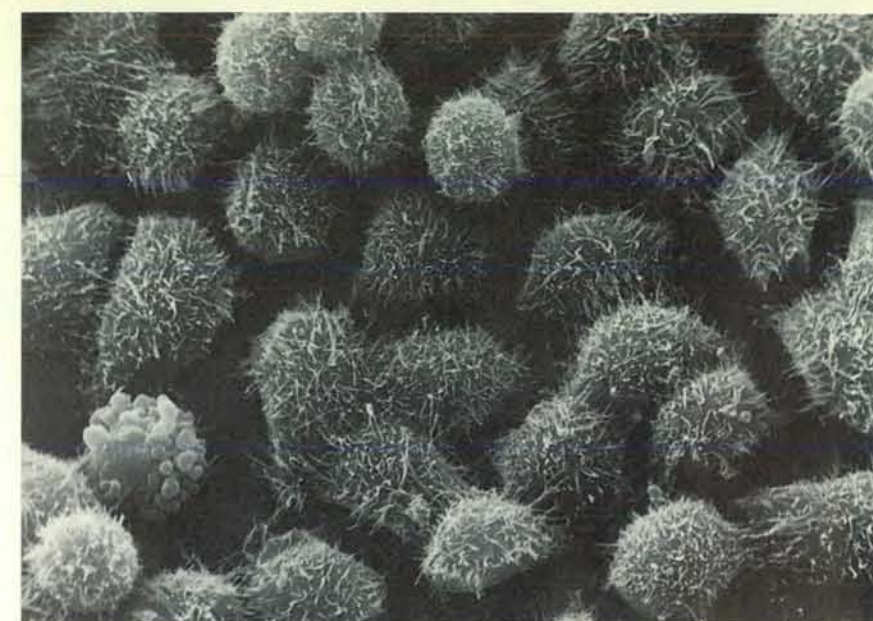
aprendosi un varco tra cellule endoteliali adiacenti.

Le due selectine, P ed E, compaiono sulle cellule endoteliali in tempi diversi e reclutano differenti tipi di globuli bianchi del sangue. Le cellule endoteliali possiedono una riserva interna di selectina P, che sono in grado di portare in pochi minuti alla loro superficie, non appena si è instaurata un'infezione. Dunque la selectina P può attirare su di sé i leucociti che agiscono durante le primissime fasi della difesa immunologica. Per contro, le cellule endoteliali sintetizzano la selectina E solo quando è necessaria e pertanto questa molecola impiega un tempo più lungo per apparire in superficie. Sembra che la sua importanza sia massima circa quattro ore dopo l'inizio di un'infezione, dopodiché si ha la sua graduale scomparsa.

Il meccanismo che contribuisce a far passare i leucociti attraverso la barriera endoteliale è indispensabile perché questi possano espletare tutti i loro compiti di lotta all'infezione. Ma lo stesso meccanismo, se agisce in modo non appropriato, permette anche ai leucociti di accumularsi in tessuti che non sono di loro pertinenza, dove provocano danni, rigonfiamenti e dolore.

Per esempio, l'infiammazione dell'artrite reumatoide ha luogo quando i globuli bianchi del sangue penetrano nelle articolazioni e vi liberano enzimi proteolitici, radicali dell'ossigeno e altri fattori tossici. Un altro esempio è dato dal danno da riperfusione, un'alterazione che ha luogo dopo che il flusso di sangue è stato temporaneamente escluso da un tessuto, come avviene durante un attacco cardiaco. Quando il flusso riprende, i globuli bianchi distruggono i tessuti danneggiati dalla mancanza di ossigeno.

La produzione di farmaci in grado di inibire le reazioni infiammatorie dannose riscuote notevole interesse nel campo della ricerca teorica e applicata. In teoria, qualsiasi farmaco che interferisca con la capacità dei globuli bianchi del sangue di aderire all'endotelio e, di conseguenza, con la fuoriuscita dei globuli dal vaso sanguigno, dovrebbe avere una funzione antinfiammatoria. La chiave per riuscire a produrre questo tipo di sostanze sta nella conformazione delle regioni di legame delle molecole di selectina e nella conformazione dei carboidrati a esse corrispondenti. Le ricerche per determinare queste conformazioni stanno procedendo speditamente. In vari laboratori si sta cercando di sintetizzare carboidrati in grado di inibire le selectine P ed E.

Perché una terapia antiadesiva possa avere successo, i farmaci devono simultaneamente realizzare due finalità che sono in apparenza incompatibili. Da una parte devono impedire ai globuli bianchi del sangue di abbandonare il circolo sanguigno in modo improprio; dall'altra devono permettere comunque a queste cellule di spostarsi dove sono richieste. Queste finalità sono realizzabili in quanto le specificità delle molecole che sono coinvolte nel processo adesivo variano nei differenti tessuti. Per esempio, si può immaginare un farmaco che impedisca ai globuli bianchi di penetrare nelle articolazioni, ma non di raggiungere altre parti del corpo.

Le cellule neoplastiche presentano in superficie carboidrati insoliti, che possono spiegare molte delle loro proprietà invasive. Si spera di riuscire a ottenere farmaci che siano in grado di interferire con la capacità adesiva delle cellule cancerose.

A parte il loro coinvolgimento nel processo infiammatorio, le molecole responsabili dell'adesione tra cellule possono svolgere un ruolo in altre malattie: per esempio, nella diffusione nell'organismo di cellule neoplastiche a partire dal tumore primario. Il carboidrato riconosciuto dalla selectina E si esprime, tanto per citare un esempio, sulle cellule di differenti tumori, tra cui alcuni tumori maligni. Di recente Bevilacqua ha riferito che almeno un tipo di cellula neoplastica umana si lega in modo specifico alla selectina E espressa sull'endotelio attivato. Forse per favorire la propria metastasi, alcune cellule neoplastiche reclutano le molecole responsabili dell'adesione tra cellule che fanno parte delle difese corporee.

Se così fosse, i farmaci antiadesivi potrebbero anche essere inibitori della metastasi. Di recente, il gruppo diretto da Hakomori ha studiato le cellule di melanoma di topo, che danno facilmente metastasi e che contengono una lectina specifica per il lattosio, lo zucchero del latte. Questi ricercatori hanno trovato che, esponendo tali cellule a composti contenenti lattosio prima di iniettarle nei topi, potevano ridurre quasi della metà la loro diffusione metastatica.

L'importanza dei carboidrati nel riconoscimento cellulare è immensa, ma esistono altri modi di riconoscimento che si basano su un linguaggio costituito da peptidi. Per esempio, alcune forme di attacco coinvolgono proteine di superficie, le integrine, e peptidi complementari. L'esistenza di più di un sistema per le attività di legame conferisce flessibilità al repertorio di interazioni di una cellula.

Siamo ancora lontani dall'aver compreso nei dettagli la struttura dei carboidrati presenti sulle superfici cellulari e la specificità che le lectine hanno per essi. Quando ne sapremo di più, sarà più facile progettare efficaci e selettivi inibitori delle interazioni tra cellule. Potrebbe non essere lontano il giorno in cui farmaci antiadesivi, forse in forma di pillole rivestite di carboidrati e con carboidrati come eccipienti, saranno utilizzati per prevenire e curare le infezioni, le infiammazioni, le conseguenze di attacchi cardiaci e forse addirittura il cancro.

BIBLIOGRAFIA

SHARON N. e LIS H., *Lectins as Cell Recognition Molecules* in «Science», 246, 13 ottobre 1989.

KARLSSON KARL-ANDERS, *Glycobiology: A Growing Field for Drug Design* in «Trends in Pharmacological Sciences», 12, n. 7, luglio 1991.

DRICKAMER K. e CARVER J., *Carbohydrates and Glycoconjugates: Upwardly Mobile Sugars Gain Status as Information-Bearing Molecules* in «Current Opinion in Structural Biology», 2, n. 5, ottobre 1992.

Gli albori della storia della Terra

Le tecniche di radiodatazione hanno già illuminato ampi periodi della storia geologica; ora sta diventando finalmente possibile aprire uno squarcio nell'oscurità delle primissime fasi evolutive del nostro pianeta

di Derek York

Le tecniche di datazione con isotopi radioattivi forniscono un potente mezzo per la misurazione del tempo geologico. Esse hanno rivelato con quale velocità si sia evoluto il nostro pianeta e hanno permesso di stabilirne l'età in circa quattro miliardi e mezzo di anni. Tuttavia le primissime fasi della storia terrestre - durante le quali si è verificata la differenziazione del grande nucleo ferroso e dei continenti, leggeri e mobili - si sono sottratte alla radiodatazione, a causa dei molti processi che hanno riazzerato l'orologio radioattivo. Con la deriva dei continenti sulla superficie terrestre, la crosta oceanica che si trova tra di essi viene «riciclata» nel caldo interno. Laddove i continenti vanno in collisione, si formano montagne a pieghe. Il caldo materiale sottostante invade le rocce continentali e può aprirsi una via fino a fuoriuscire in superficie come lava. L'erosione spiana poi le montagne e fa affluire sedimenti in profondità. Anche questi sedimenti ritorneranno al mantello.

Gli studiosi di scienze della Terra stanno ora adottando tecniche sempre più sofisticate per strappare informazioni significative sui primissimi eventi della storia terrestre a rocce che finora si erano dimostrate del tutto reticenti. L'esame di antichi minerali sta rivelando quando apparvero i primi continenti e quale fosse la loro estensione. Si sta anche accertando, in contrasto con alcune previsioni teoriche, che la tettonica delle zolle è stata attiva per la maggior parte della storia della Terra secondo le stesse modalità di oggi. Le scoperte recenti stanno completando dettagli rimasti a lungo misteriosi sul periodo di formazione nel quale il nostro pianeta fissò molti dei suoi tratti caratteristici.

Per cercare indizi sulla natura della Terra primordiale, i geofisici si basano su un assortimento di metodi radiometrici. Questi presentano diversi punti di forza e di debolezza, ma si fondano tutti sulla determinazione delle abbondanze relative di un certo isotopo radioattivo e dell'elemento «figlio» in cui quell'isotopo decade. Ogni isotopo radioattivo finisce col convertirsi in un prodotto di decadimento stabile. Noto il tasso di decadimento (che può essere misurato con precisione in laboratorio), si può dedurre in quanto tempo si siano accumulati i prodotti di decadimento presenti in una roccia. Questa informazione, insieme a indizi di altro tipo, rivela molto sulla storia geologica di quella roccia.

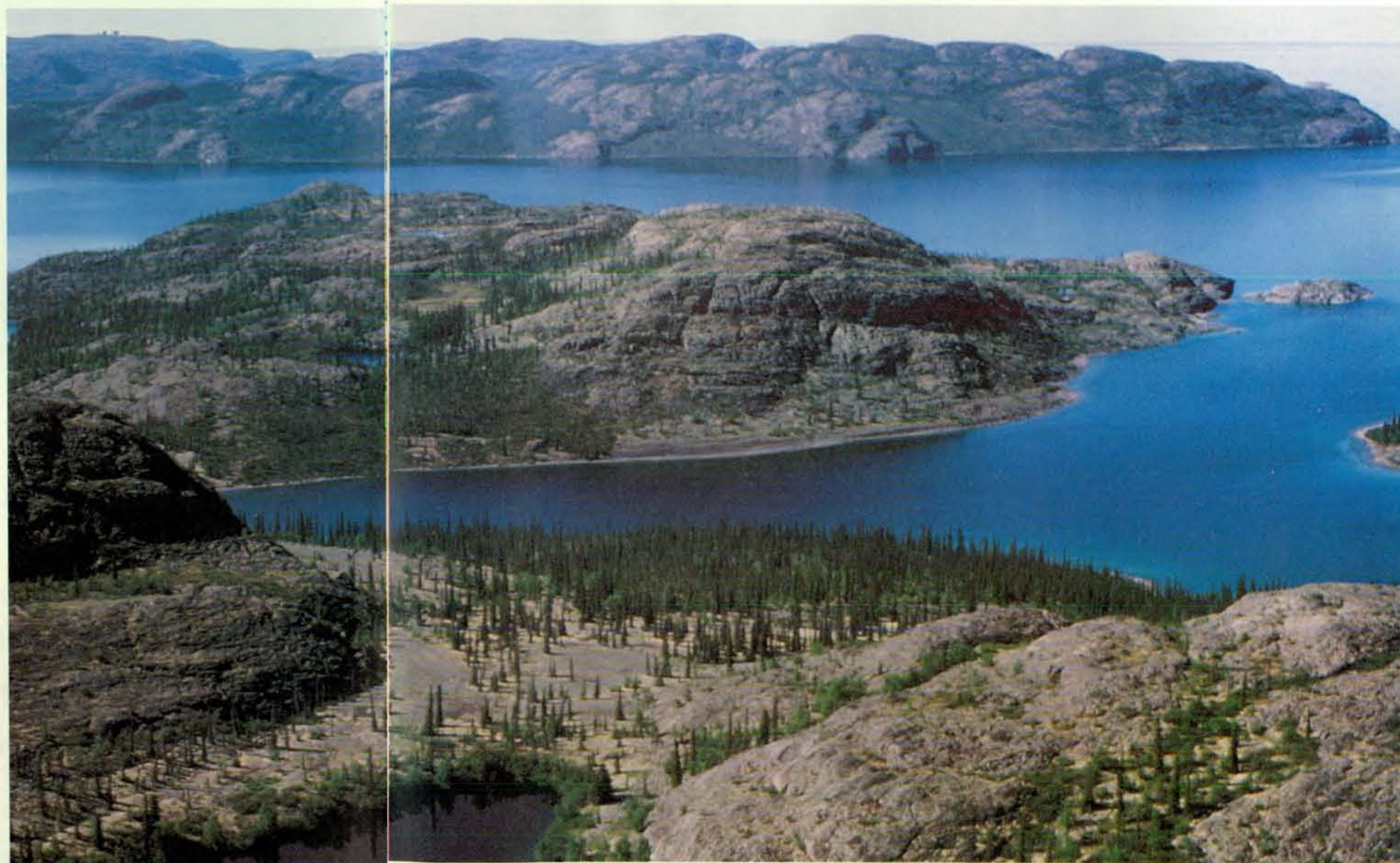
Nella continua ricerca delle più antiche vestigia continentali si prendono in considerazione innanzitutto gli isotopi dell'uranio. L'uranio finisce col decadere in piombo, cosicché la tecnica di datazione che si basa su questi due elementi prende il nome di metodo uranio-piombo. Essa è facilitata dalla possibilità di estrarre da cristalli di zircone campioni di uranio e piombo sufficienti per l'analisi. Questi cristalli si trovano assai comunemente nelle rocce granitiche e metamorfiche, ma anche in alcune rocce vulcaniche e nei materiali sedimentari derivati da ognuna di queste. Gli zirconi resistono molto bene al calore e all'alterazione a opera dei fluidi circolanti, cosicché possono conservarsi intatti anche dopo aver subito uno o più episodi di metamorfismo.

Un potenziale problema connesso a questo metodo di datazione consiste nel fatto che rocce sottoposte a condizioni estreme di pressione e temperatura possono perdere una frazione significativa del loro contenuto in piombo, riportando indietro l'orologio radioattivo. Nel 1956 George W. Wetherill della Carnegie Institution di Washington dimostrò come aggirare questa difficoltà. Il suo procedimento si basa sul fatto che esistono due isotopi radioattivi dell'uranio: l'uranio 238 e l'uranio 235. Ognuna delle due forme segue una propria catena di decadimento: l'uranio 238 si trasforma alla fine in piombo 206; l'uranio 235 in piombo 207. Pertanto, per ogni minerale che contenga uranio, si può ricavare una stima dell'età per due vie diverse.

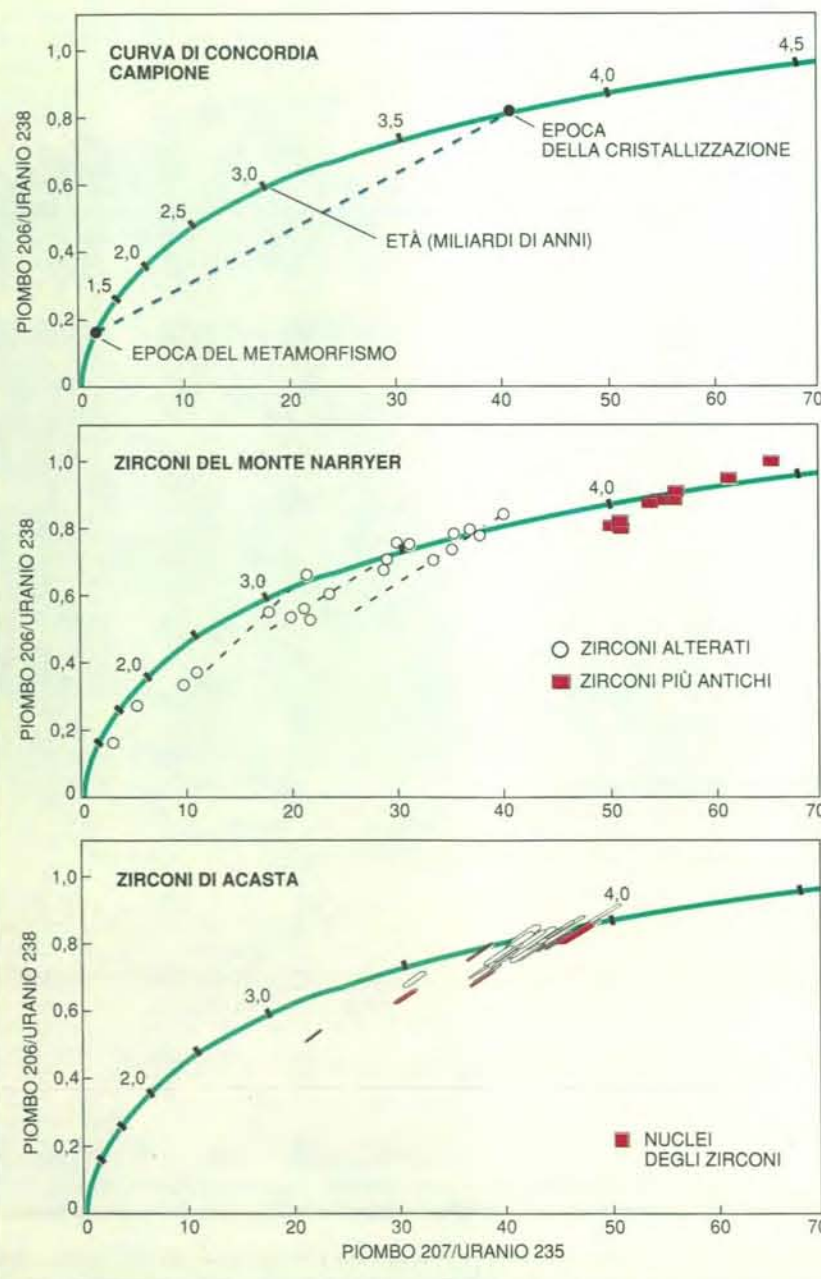
Wetherill misurò i due rapporti di abbondanza uranio/piombo in molti campioni e realizzò grafici di confronto. Risultò che i campioni indisturbati (quelli che non avevano mai subito metamorfismo, da considerare pertanto «orologi perfetti») potevano essere raccordati con un curva continua, che Wetherill denominò «curva di concordia». La curva riflette semplicemente il fatto che sia l'uranio 238 sia l'uranio 235 decadono con tasso costante e prevedibile.

Wetherill fece quindi la notevole scoperta che, realizzando grafici dei rapporti di abbondanza, si poteva determinare l'età di un gruppo di campioni di roccia coevi anche se la maggior parte del loro contenuto in piombo era andata perduta in episodi di metamorfismo. Il suo metodo funziona perché il piombo 206 e il piombo 207 sono identici dal punto di vista chimico, per cui si può supporre che sfuggano dalla roccia frazioni uguali dei due isotopi. Quando i rapporti di abbondanza tra uranio e piombo vengono misurati e rappresentati in grafico, i punti associati ai vari campioni si situano lungo una linea retta che giace al di sotto della curva di concordia. I punti estremi di questa retta intersecano la curva di concordia in posizioni che corrispondono all'epoca di cristallizzazione della roccia e a quella di metamorfismo.

Applicare il metodo uranio-piombo agli zirconi può essere difficile, dato che i cristalli di zircone presentano una struttura stratificata nella quale il nucleo di accrescimento originario è avvolto da rivestimenti successivi di minerale. Negli anni settanta Thomas E. Krogh del Royal Ontario Museum di Toronto mostrò come fosse possibile «spogliare» per abrasione il nucleo dai rivestimenti; dimostrò anche che i rapporti uranio-piombo dei nuclei ricadevano frequentemente sulla curva di concordia di Wetherill. Krogh concluse che le parti interne dello zircone non erano state alterate chimicamente, cosicché da esse era possibile ricavare l'epoca della prima cristallizzazione del minerale.

Durante gli anni ottanta, William Compston e Steven Clement della Australian National University di Canberra fecero un ulteriore progresso nella datazione degli zirconi. Invece di analizzare l'intero nucleo dello zircone tutto in una volta, come si era fatto fino ad allora,

La formazione degli gneiss di Acasta, nel Canada settentrionale, è il più antico frammento intatto conosciuto della superficie terrestre. La radiodatazione suggerisce un'età di quasi quattro miliardi di anni e dimostra che esisteva già materiale continentale a poche centinaia di milioni di anni dalla formazione del pianeta.

Come funziona il metodo di datazione uranio-piombo

I cristalli di zircone contengono due isotopi dell'uranio: l'uranio 235, che decade in piombo 207, e l'uranio 238, che decade in piombo 206. In zirconi indisturbati, i grafici che mettono a confronto i due rapporti di abbondanza uranio-piombo mostrano una curva continua denominata curva di concordia; la posizione di un punto sulla curva indica l'età del campione corrispondente. I dati uranio-piombo per zirconi che hanno subito un episodio di metamorfismo e hanno perduto in conseguenza di ciò parte del loro piombo cadranno lungo una retta che interseca la curva di concordia in due punti (*in alto*). Il punto superiore corrisponde all'epoca della cristallizzazione originaria della roccia; quello inferiore indica l'epoca del metamorfismo. Gli zirconi provenienti dal Monte Narryer, in Australia, mostrano tutti qualche segno di perturbazione (*al centro*). A giudicare dalla posizione sulla curva di concordia, i più antichi zirconi del Monte Narryer sembrano avere un'età compresa fra 4,1 e 4,2 miliardi di anni; gli altri si distribuiscono in tre famiglie che hanno rispettivamente 3,1, 3,3 e 3,75 miliardi di anni. In base a una logica analoga, gli zirconi provenienti dagli gneiss di Acasta sembrano essersi cristallizzati circa 3,96 miliardi di anni fa (*in basso*).

Compston e Clement cercarono di studiarne la composizione - e quindi l'età - con misurazioni puntuali. Essi costruirono allo scopo un dispositivo che potesse colpire il campione con un fascio molto focalizzato (del diametro di 25 micrometri) di atomi ionizzati, ovvero elettricamente carichi, di ossigeno. Compston e Clement chiamarono il loro strumento SHRIMP, acronimo di Super High-Resolution Ion Micro-Probe e lo sperimentarono su un punto all'interno di un cristallo di zircone che era stato preventivamente sezionato a metà. Gli ioni vaporizzano gli atomi di uranio e di piombo in quel punto; gli atomi vengono quindi fatti passare in uno spettrometro di massa che li separa e li conta.

Nel 1983 SHRIMP iniziò a fornire nuove e notevoli informazioni circa l'età della crosta terrestre. Derek O. Froude della Australian National University, lavorando con Compston e altri, iniziò ad analizzare singoli cristalli di zircone in quarziti (arenarie metamorfosate) del Monte Narryer, in Australia occidentale. Lavori precedenti avevano indicato che in questa regione si trovano rocce dell'età di 3,6 miliardi di anni. Il gruppo di Froude condusse dettagliate analisi su 20 cristalli di zircone contenuti in un campione di roccia. Quattro di quei cristalli mostravano rapporti puntuali uranio-piombo indicativi di un'età da 4,1 a 4,2 miliardi di anni. In precedenza, i più antichi frammenti conosciuti di materiale terrestre erano rocce provenienti dalla Groenlandia sudoccidentale, che Stephen Moorbath dell'Università di Oxford e collaboratori avevano datato a 3,8 miliardi di anni fa. Gli altri 16 zirconi fornivano rapporti isotopici che tendevano a disporsi lungo tre rette che intersecavano la curva di concordia in punti corrispondenti a età di circa 3,75, 3,3 e 3,1 miliardi di anni.

Froude dedusse che gli zirconi più antichi si fossero formati molto tempo prima di essere incorporati nelle rocce sedimentarie circostanti. In qualche modo, gli zirconi erano stati erosi dalla loro roccia madre e depositati nei sedimenti che più tardi, subendo altissime pressioni e temperature, sarebbero diventati le quarziti del Monte Narryer. Gli zirconi più giovani devono avere iniziato a formarsi durante quel periodo di metamorfismo. Dato che gli zirconi si trovano quasi esclusivamente in rocce continentali e non oceaniche, le scoperte australiane facevano ritenere con grande probabilità che almeno un po' di materiale continentale esistesse già più di quattro miliardi di anni fa. Sfortunatamente, gli zirconi sembrano essere le uniche vestigia di quelle antiche rocce.

Nel 1989 Samuel A. Bowring, allora alla Washington University, in collaborazione con Ian S. Williams della Australian National University e Compston, provò l'esistenza di rocce intatte all'incirca dell'età degli zirconi australiani analizzando con SHRIMP zirconi degli gneiss di Acasta, un piccolo affioramento di rocce metamorfiche a sud-est del Gran Lago degli Orsi, nei Territori del Nord-Ovest, in Canada. Bowring e colleghi avevano in precedenza usato la tecnica di abrasione di Krogh per determinare che alcuni zirconi degli gneiss di Acasta avevano un'età di almeno 3,8 miliardi di anni. Bowring sospettava che questi zirconi celassero la prova di età ancora più antiche; forse queste informazioni potevano essere estratte usando SHRIMP. Volò dunque a Canberra, recando con sé zirconi di due campioni di roccia di Acasta.

I ricercatori eseguirono un totale di 82 sondaggi puntuali su 53 zirconi. Una volta rappresentati in grafico, i rapporti uranio-piombo dei due campioni si disponevano a ventaglio in prossimità della curva di concordia. Quelli di un campione ricadevano tra 3,6 e 3,96 miliardi di anni; gli altri tra 3,8 e 3,96 miliardi di anni. Bowring e i suoi collaboratori conclusero che gli zirconi più antichi testimoniavano l'età della cristallizzazione originaria della roccia. La dispersione dei dati indica probabilmente che gli zirconi subirono almeno due episodi di metamorfismo, uno a distanza di poche centinaia di milioni di anni dalla cristallizzazione, l'altro circa due miliardi di anni fa.

Se questa interpretazione è corretta, allora gli gneiss di Acasta costituiscono i resti metamorfosati delle più antiche rocce solide conosciute sulla superficie terrestre. I geologi hanno identificato altre rocce circa della stessa età in Groenlandia, Labrador e Australia occidentale. Lance P. Black del Bureau of Mineral Resources di Canberra e altri, sempre usando SHRIMP, hanno di recente riferito il ritrovamento in Antartide di zirconi dell'età di 3,87 miliardi di anni.

Questi risultati lasciano pochi dubbi sul fatto che almeno piccoli frammenti di roccia continentale siano esistiti alla superficie della Terra nei primi 700 milioni di anni della sua storia; sottolineano anche l'incredibile scarsità di rocce crostali più antiche di quattro miliardi di anni. La tettonica delle zolle da sola può non essere sufficiente a spiegare perché queste rocce siano così rare. Forse la Terra aveva una estesa crosta primigenia, che fu distrutta e rimescolata in seguito all'impatto di meteoriti giganti, residui del processo di formazione dei pianeti. Un'intensa convezione, provocata dal grande calore interno del pianeta neonato, potrebbe avere facilitato la distruzione della crosta, lacerando i blocchi rocciosi continentali e spingendo in profondità i sedimenti continentali.

D'altro canto, appare sempre più certo, sulla base di argomenti geochimici, che prima di circa quattro miliardi di anni fa l'ammontare totale della crosta continentale fosse minuscolo. Studi sulle abbondanze relative degli isotopi di neodimio, stronzio e piombo nella crosta continentale e oceanica implicano che prima di quell'epoca esistessero solo quantità trascurabili di crosta continentale. Circa 3,8 miliardi di anni fa il mantello terrestre cominciò a differenziarsi in componenti più leggere e più dense, e così si costituirono i materiali da cui presero forma i blocchi continentali. Sembra che i continenti abbiano continuato ad accrescersi rapidamente fino a circa 2,5 miliardi di anni fa.

Ma quali erano i processi dinamici interni della Terra in questa era di rapida espansione continentale? Il mio gruppo a Toronto, in collaborazione con Alfred Kröner dell'Università Gutenberg di Magonza e Michael O. McWilliams della Stanford University, ha tentato di affrontare tale questione valutando l'entità della deriva continentale in quel periodo. È possibile ricostruire i movimenti continentali recenti per mezzo della «registrazione» del campo magnetico terrestre conservata nella crosta oceanica. Una porzione di crosta oceanica sopravvive solo 200 milioni di anni circa prima di essere sospinta nel mantello in corrispondenza dei margini di zolla, come le fosse del Pacifico al largo dell'Asia.

Per determinare come avvenissero i movimenti continentali oltre due miliardi di anni fa, occorre estendere gli strumenti della geocronologia così da includere misurazioni del magnetismo interno delle rocce. Quando le lave vengono eruttate o quando si formano intrusioni granitiche negli strati esterni della Terra, gli ossidi di ferro presenti nelle rocce si magnetizzano secondo la direzione del campo magnetico terrestre in quel punto (gli ossidi di ferro si comportano come minuscoli aghi magnetici che si orienta-

In cerca delle rocce più antiche, Samuel A. Bowring, ora al Massachusetts Institute of Technology, è giunto agli gneiss di Acasta. Bowring e collaboratori hanno ottenuto da queste rocce cristalli di zircone e ne hanno evidenziato la struttura interna. I ricercatori hanno poi misurato i rapporti uranio-piombo in diversi punti dei cristalli, per trovare le parti in assoluto più antiche. Le piccole bolle sono state prodotte dai fasci ionici impiegati per vaporizzare le porzioni da analizzare.

Un fascio laser illumina il passato

Il riscaldamento «a gradini» con il laser offre un metodo efficace per misurare sia l'età sia la storia termica di un campione di minerale. Con questa tecnica, l'età viene misurata dall'entità del decadimento del potassio radioattivo in argo 40. Come primo passo, il campione viene bombardato con neutroni, che trasformano parte del potassio in argo 39 (*a sinistra*). Un intenso fascio laser riscalda il campione e provoca la liberazione di entrambi gli isotopi dell'argo; uno spettrometro di massa misura le esatte abbondanze degli isotopi. All'aumentare del riscaldamento, viene espulsa una quantità sempre maggiore di argo (*passi 1-4, al centro*); a ogni passo, dal rapporto fra argo 40 e argo 39 è possibile ricavare un'età. Le età «recenti», a basse temperature, indicano che parte dell'argo è sfuggita nel corso della storia del campione; l'età corrispondente al *plateau*, alla temperatura più alta, dovrebbe riflettere la vera età del campione. Qui sotto, il riscaldamento con laser di quattro cristalli di orneblenda provenienti dai graniti di Mbabane, nello Swaziland, mostra che essi hanno un'età di 2,7 miliardi di anni, in stretto accordo con l'età ricavata dalle misurazioni uranio-piombo. L'analisi delle komatiiti, lave provenienti dalla stessa regione, rivela che esse si solidificarono circa 3,5 miliardi di anni fa.

no nella direzione del polo nord). Misurando la direzione del campo «congelato» all'interno delle rocce, si può risalire alla posizione del polo magnetico al tempo della formazione, ovvero del raffreddamento, della roccia. Studiando il magnetismo di rocce risalenti a età diverse, tutte provenienti dalla stessa regione, si può in linea di principio ricostruire di quanto il continente sia andato avvicinandosi o allontanandosi rispetto al polo nel corso del tempo.

Purtroppo, se una roccia viene riscaldata al di sopra di una temperatura critica, essa perde la propria orientazione magnetica originaria e, raffreddandosi, ne acquista un'altra. La nuova direzione può differire totalmente dall'originaria se i continenti si sono nel frattempo spostati in latitudine in misura significativa. Se la roccia non ha subito un riscaldamento troppo forte, però, la sua orientazione magnetica originaria può conservarsi almeno in parte. In questo caso, si può ricavare dalla roccia una registrazione del campo magnetico, e quindi della posizione dei poli, in due tempi diversi: quello iniziale di formazione della roccia e quello del suo riscaldamento per metamorfismo. Dato che tutte le rocce precambriane conosciute hanno subito qualche episodio di riscaldamento, occorre determinare la «storia termica» di ognuna per poter riconoscere il significato delle orientazioni magnetiche.

Un valido metodo di radiodatazione, la tecnica del potassio-argo, può in qualche caso consentire di determinare l'età delle rocce magnetizzate e di appurare se e in quale misura esse abbiano subito riscaldamenti successivi alla loro formazione. Il potassio 40, un isotopo raro, decade in argo 40, versione pesante del gas nobile; il tempo di dimezzamento del potassio 40 è di 1,3 miliardi di anni. Misurando la quantità di argo 40 in minerali contenenti potassio, si può determinare quanto tempo fa quel minerale si sia solidificato.

La datazione con la tecnica del potassio-argo ha contribuito alla determinazione della scala dei tempi dell'evoluzione biologica per gli ultimi 500 milioni di anni. Si è dimostrata meno adeguata per risalire a ere più antiche, data la tendenza dell'argo a sfuggire dai minerali che lo contengono durante le fasi di riscaldamento metamorfico. Il metodo uranio-piombo, associato con la meno frequentemente usata tecnica rubidio-stronzio, risulta più efficace per la determinazione delle età di formazione delle rocce più antiche.

La stessa facilità con cui l'orologio potassio-argo può essere disturbato offre in compenso un altro vantaggio: consente di ricostruire la storia termica di una roccia. Questa informazione permette a sua volta di dare un senso alla storia magnetica della roccia stessa. Sono stati studiati molti tipi differenti di minerali per determinare con quale facilità essi tendano, per riscaldamento, a liberare l'argo in essi intrappolato. L'orneblenda si è dimostrata abbastanza restia a liberare argo: di regola, solo un riscaldamento molto intenso (al di sopra di 500 gradi Celsius circa) è in grado di far sì che ne sfugga un poco. Muscovite e biotite, due forme della mica, sono molto meno resistenti al calore: questi minerali possono essere «disturbati» da temperature comprese fra i 250 e i 350 gradi Celsius. All'altro estremo, i feldspati liberano argo già a temperature inferiori a 200 gradi Celsius.

Coloro che cercano indizi di deriva dei continenti nella prima metà della storia della Terra hanno concentrato gran parte della propria attenzione su una serie di rocce notevolmente ben conservate nella fascia delle pietre verdi di Barberton Mountain Land, situata al confine tra Repubblica Sudafricana e Swaziland. Queste rocce fanno parte del cratone di Kaapvaal, una porzione di crosta continentale stabile ed estremamente antica. La fascia delle pietre verdi consiste di numerose rocce vulcaniche ricoperte da una successiva sedimentazione. Rocce granitiche più giovani si sono fatte strada negli strati antichi di pietre verdi.

Assieme ai miei collaboratori ho cercato segni di deriva continentale più antichi di due miliardi di anni, compiendo dettagliate analisi magnetiche e datazioni di cristalli di zircone (con i metodi potassio-argo e uranio-piombo) su due campioni di granito provenienti dal cratone di Kaapvaal. A Magonza, Kröner ha applicato il metodo uranio-piombo a singoli zirconi di lave del cratone di Kaapvaal, dimostrando come esse si siano cristallizzate circa 3,5 miliardi di anni fa, in buon accordo con misurazioni precedenti effettuate all'Università di Cambridge. Kröner fissò inoltre l'età di graniti provenienti dalla regione di Nelshootge, sempre compresa nel cratone di Kaapvaal, a 3,2 miliardi di anni circa, e quella di graniti della vicina regione di Mbabane a 2,69 miliardi di anni.

Con Paul W. Layer e Margarita Lopez-Martinez ho condotto, nel mio laboratorio all'Università di Toronto, datazioni con il metodo potassio-argo per studiare la storia termica delle rocce, condizione per interpretarne la magnetizzazione. Abbiamo utilizzato per la verità un'ingegnosa variante del metodo potassio-argo: il cosiddetto metodo argo-argo, proposto originariamente da Craig M. Merrihue, dell'Università della California a Berkeley. Questo metodo prevede che un campione di roccia venga irradiato con neutroni provenienti da un reattore nucleare, trasformando in questo modo parte del potassio in argo 39. Il campione viene quindi fuso in una camera a vuoto, per liberare sia l'argo 39 sia l'argo 40. Invece di compiere misurazioni separate delle abbondanze di potassio e argo, si può così fare una singola osservazione dei due isotopi dell'argo per risalire all'età del campione.

Merrihue si rese conto che la sua tecnica poteva anche fornire informazioni vitali sulla storia termica della roccia in studio. Egli suggerì allora di non fondere il minerale irradiato tutto in una volta, ma di riscaldare il campione «a gradini» e misurare il rapporto fra argo 40 e argo 39 in corrispondenza di ogni temperatura. Se per ogni gradino si ottiene la stessa età, si può ragionevolmente ritenere che il campione abbia subito scarse perturbazioni termiche durante la sua storia. Se le età misurate sono relativamente recenti a basse temperature di laboratorio e aumentano fino a raggiungere un valore costante in corrispondenza di alte temperature, allora parte dell'argo 40 dev'essere andata perduta dal minerale nel corso di uno o più eventi di riscaldamento. L'età data dal valore costante tiene conto di tutto l'argo 40, compreso quello che viene liberato solo in condizioni di temperatura estremamente alta, cosicché dovrebbe dare una buona indicazione sull'epoca di raffreddamento originario della roccia, quando si è attivato l'orologio potassio-argo.

A Toronto, io e i miei collaboratori abbiamo applicato il metodo descritto ai graniti di Nelshootge e Mbabane, come pure a lave associate alle rocce vulcaniche che Kröner aveva datato studiandone gli zirconi. Adottammo anche un'altra innovazione: una tecnica di riscaldamento con laser che avevo messo a punto a Toronto in collaborazione con Chris M. Hall, attualmente all'Università del Michigan, e Yotaro Yanase. Una tecnica simile era stata sperimentata negli anni settanta da George H. Megrue della Smithsonian Institution. Egli aveva dimostrato che è possibile misurare l'età di un minerale col metodo argo-argo vaporizzando parte del campione con un laser impulsato. Il suo metodo non suscitò all'epoca grande interesse poiché non si riusciva a modulare la potenza del laser così da riscaldare il campione con precisi incrementi di temperatura.

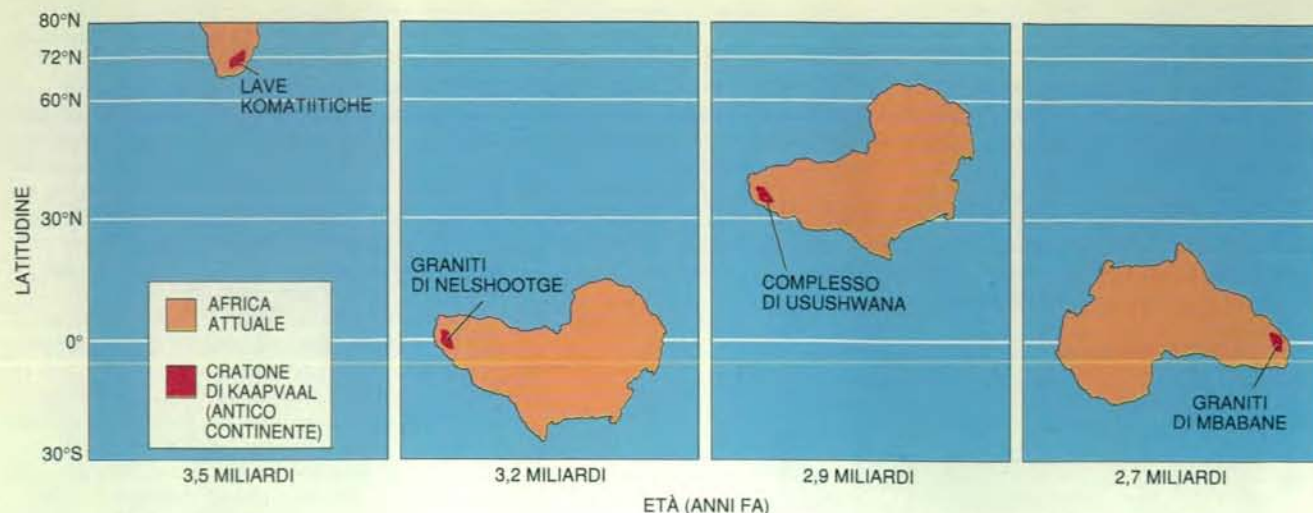
Modificando la tecnica di Megrue, siamo riusciti a usare un laser a fascio continuo (non impulsato) per produrre un preciso spettro di età da un singolo grano di roccia. Abbiamo iniziato collocando un frammento di minerale in un fascio laser di bassa potenza per la durata di 30 secondi e analizzando l'argo liberato per mezzo di uno spettrometro di massa. Abbiamo quindi incrementato la potenza del fascio laser per salti discreti, ricavando a ogni gradino l'età corrispondente. Quando il minerale fonde, vuol dire che ha raggiunto la sua temperatura di cristallizzazione, e lo spettro di età è completo.

La combinazione di riscaldamento con laser e di analisi argo-argo sta fornendo informazioni sorprendentemente precise sull'età e la storia termica di rocce antiche. Queste informazioni ci hanno permesso di ricostruire un quadro ben documentato (e senza precedenti) di come avveniva la deriva dei continenti miliardi di anni fa. Abbiamo iniziato considerando la storia del granito di Mbabane. Layer e McWilliams hanno scoperto che questa roccia ha un'orientazione magnetica tale da far ritenere di essersi formata in prossimità dell'equatore. Ulteriori analisi hanno dimostrato che il granito di Mbabane acquisì la propria orientazione magnetica nel raffreddarsi da circa 600 a 500 gradi Celsius.

La datazione argo-argo di quattro cristalli di orneblenda presenti nel granito, condotta dal mio gruppo a Toronto, produsse uno spettro di età che presentava un ampio *plateau* a 2,69 miliardi di anni, in sostanziale concordanza con le età degli zirconi ricavate da Kröner con il metodo uranio-piombo. Lo stretto accordo delle due tecniche di datazione implica che le orneblende, e quindi l'intero granito, non siano state riscaldate a più di 500 gradi Celsius dopo la loro formazione. Abbiamo tratto la conclusione che la posizione del polo magnetico dedotta in base all'orientazione magnetica del granito fosse proprio quella relativa al tempo della formazione della roccia, circa 2,69 miliardi di anni fa, quando i graniti di Mbabane si trovavano in prossimità dell'equatore terrestre.

Layer e colleghi avevano già dedotto che un altro gruppo di rocce ignee, ora situato a circa 12 chilometri di distanza dai graniti di Mbabane, circa 2,875 miliardi di anni fa si trovava a poco più di 30 gradi di latitudine. Se queste due formazioni sono sempre state attigue, allora quella zona del cratone di Kaapvaal deve essersi spostata di 30 gradi di latitudine tra 2,875 e 2,69 miliardi di anni fa. Un tale spostamento implica una velocità di deriva di circa 1,5 centimetri all'anno, paragonabile a quella con la quale il continente nordamericano è andato allontanandosi dalla Dorsale medio-atlantica negli ultimi 100 milioni di anni. Ci siamo chiesti naturalmente se la tettonica delle zolle si svolgesse alla stessa velocità in tempi ancora più antichi.

Kröner aveva dimostrato che il granito di Nelshootge risaliva a 3,21 miliardi di anni fa. L'analisi con laser di singoli cristalli di orneblenda faceva pensare che la roccia avesse acquisito la propria orientazione magnetica in un momento precoce della sua storia, almeno 3,18 miliardi di anni fa. Quando esaminammo l'orientazione del campo magnetico nel granito trovammo che anch'essa sembrava corrispondere a una posizione a circa 90 gradi dai poli, vale a dire in prossimità dell'equatore. Ma la direzione del polo nord registrata nei graniti di Nelshootge differiva di molti gradi rispetto a quella dei graniti di Mbabane, cosicché si poteva supporre che il cratone di Kaapvaal avesse subito una rotazione considerevole nel tempo intercorso tra le due formazioni granitiche.

Infine ci accingemmo a esaminare le più vecchie rocce di Barberton da noi raccolte, frammenti di lave ricche in magnesio denominate komatiiti. Gli zirconi

La deriva primordiale dei continenti è registrata nei campi magnetici «congelati» in quattro tipi di roccia del cratone di Kaapvaal, una regione di crosta continentale stabile ed estremamente antica (l'Africa, qui mostrata per riferimento, non aveva ovviamente la forma attuale). La magnetizzazione conservata nelle rocce permette di risalire all'orientazione del cratone e alla sua latitudine. La velocità di deriva del cratone corrisponde circa a quella dell'attuale tettonica delle zolle.

nelle rocce vulcaniche correlate a queste lave sono stati datati ad almeno 3,5 miliardi di anni fa. David J. Dunlop e Chris J. Hale dell'Università di Toronto hanno riconosciuto un debole campo magnetico «congelato» nelle komatiiti, il quale indica come queste lave, al momento del loro raffreddamento, si trovassero a soli 18 gradi circa dal polo. Il significato di questa scoperta non era comunque chiaro. Le lave furono evidentemente esposte a calore e pressione molto intensi in tempi successivi alla loro formazione; esse conservano i minerali originari in misura scarsa o nulla, cosicché si può ipotizzare che la magnetizzazione osservata da Dunlop e Hale sia molto più recente di 3,5 miliardi di anni.

Per chiarire la questione, Margarita Lopez-Martinez, allora ricercatrice nel mio laboratorio, effettuò una misurazione con il metodo argo-argo per determinare l'età dei campioni di komatiite. Con sua e mia sorpresa, le età da lei determinate erano identiche a quelle che Kröner aveva trovato studiando gli zirconi nelle lave. Gli zirconi permettono di datare la cristallizzazione iniziale delle lave, mentre l'analisi argo-argo misura l'età della tremolite, un minerale che si forma durante il metamorfismo. L'unico modo per dare un senso ai risultati della Lopez-Martinez è concludere che l'evento metamorfico che diede origine alla tremolite sia avvenuto quasi immediatamente dopo l'eruzione di quelle lave. Se così è, la posizione dei poli nelle komatiiti di Barberton costituisce una registrazione autentica della localizzazione della roccia circa 3,5 miliardi di anni fa.

Mettendo insieme gli elementi fin qui illustrati, si ottiene una storia di 800 milioni di anni per la deriva del cratone di Kaapvaal, storia che sarebbe iniziata 3,5 miliardi di anni fa. A quell'epoca, il cratone si trovava in vicinanza del polo. Circa 3,18 miliardi di anni fa si era spostato in prossimità dell'equatore. Il cratone si mosse poi per più di 3000 chilometri verso il polo, cosicché 2,875 miliardi di anni fa finì col ritrovarsi ad almeno 30 gradi di latitudine. 2,69 miliardi di anni fa il cratone si era nuovamente spostato verso l'equatore, ma la sua orientazione era notevolmente diversa da quella di 490 milioni di anni prima.

Il nostro lavoro implica che il cratone di Kaapvaal abbia subito una deriva, più o meno alla velocità attuale di spostamento dei continenti, a partire da almeno 3,5 miliardi di anni fa. Presumibilmente, anche altri frammenti continentali si comportavano allo stesso modo. Vorrei sottolineare come, nonostante i grandi progressi di metodologia e strumentazione, gli studi paleomagnetici lascino ancora la possibilità di ampi margini di errore; nondimeno, i metodi di datazione uranio-piombo e argo-argo, in combinazione con gli studi paleomagnetici, hanno molto aiutato la comprensione della dinamica della Terra nelle prime fasi della sua evoluzione.

Il successo delle nostre ricerche sulle komatiiti di Barberton ci ha condotti a domandarci se le rocce in assoluto più antiche che si conoscano, gli gneiss di Acasta, contengano una testimonianza della loro posizione rispetto al polo magnetico 3,96 miliardi di anni fa. Purtroppo sembra che non sia così. Nel mio laboratorio, Hall ha condotto datazioni preliminari col metodo argo-argo su cristalli di orneblenda contenuti in uno dei campioni di Bowring. I suoi risultati mostrano che gli orologi argo-argo di quelle rocce vennero riazzerati da una fase di attività tettonica avvenuta 1,8 miliardi di anni fa. Qualunque traccia magnetica relativa a 3,96 miliardi di anni fa sarebbe stata ovviamente cancellata.

Ma rimane una speranza. Forse ulteriori misurazioni su rocce provenienti dalla stessa regione, nel Canada settentrionale, potranno darci un piccolo frammento che sia sfuggito al riscaldamento durante quel periodo di attività tettonica. La magnetizzazione di un frammento del genere sarebbe di valore incalcolabile per interpretare l'evoluzione della Terra. Poter dimostrare che la Terra possedeva un significativo campo magnetico in una fase così precoce della sua storia equivarrebbe a dare la prova che essa aveva a quell'epoca già sviluppato un considerevole nucleo metallico: il primo passo verso la trasformazione di un pianeta neonato in un mondo complesso e ben strutturato.

BIBLIOGRAFIA

YORK D., *Cooling Histories from $^{40}Ar/^{39}Ar$ Age Spectra: Implications for Precambrian Plate Tectonics* in «Annual Review of Earth and Planetary Sciences», 12, pp. 383-409, 1984.

LAYER P. W., HALL C. M. e YORK D., *The Derivation of $^{40}Ar/^{39}Ar$ Age Spectra of Single Grains of Hornblende and Biotite by Laser Step-Heating* in «Geophysical Research Letters», 14, n. 7, luglio 1987.

LAYER P. W., KRÖNER A., McWILLIAMS M. e YORK D., *Elements of the Archean Thermal History and Apparent Polar Wander of the Eastern Kaapvaal Craton, Swaziland, from Single Grain Dating and Paleomagnetism* in «Earth and Planetary Science Letters», 93, n. 1, maggio 1989.

KRÖNER A. e LAYER P. W., *Crust Formation and Plate Motion in the Early Archean* in «Science», 256, 5 giugno 1992.

I lemuri del Madagascar

Fra tutte le scimmie sono quelle che più assomigliano all'antenato dei primati ed è quindi ancor più grave che, per la distruzione del loro habitat, molte specie si siano già estinte e altre stiano scomparendo

di Ian Tattersall

Dalle rigogliose foreste pluviali alle estese pianure costiere, dai boschi decidui ai deserti, il Madagascar offre una gamma straordinaria di ambienti. Questi habitat ospitano una fauna di primati ugualmente straordinaria, che illustra più chiaramente di qualsiasi altra come dovevano essere i primati nostri antenati all'inizio dell'Età dei mammiferi, circa 50 milioni di anni or sono.

Questi animali sono i lemuri, i mammiferi più interessanti del Madagascar. Non è del tutto chiaro perché si trovino lì. Si riteneva che il minicontinente malgascio, lungo circa 1600 chilometri, avesse semplicemente conservato (in modo alquanto impoverito) la fauna arcaica che vi risiedeva ai tempi del distacco dal continente africano e dell'inizio della deriva dell'isola verso il mare aperto. Per molti aspetti i primati «inferiori» che vivono sull'isola assomigliano molto di più ai primati dell'Eocene (periodo che va da circa 57 a 35 milioni di anni fa) di quanto non assomiglino ai primati «superiori» che dominano attualmente le regioni tropicali. Questo fatto è stato invocato per datare intorno all'Eocene la separazione dell'isola dal continente africano.

Ma oggi sappiamo che il Madagascar ha iniziato il suo viaggio di allontanamento dall'Africa 165 milioni di anni fa, quando dominavano i dinosauri e gli unici mammiferi erano piccoli e vagamente simili a toporagni. Inoltre sembra che l'isola abbia raggiunto la sua distanza attuale dall'Africa, di oltre 400 chilometri, alcune decine di milioni di anni prima della grande diversificazione dei mammiferi e perciò molto prima della comparsa dei comuni, attuali gruppi di primati, chirotteri e roditori.

A quel tempo, per i primati, gli ultimi arrivati fra gli animali che vivono sulla terraferma, l'unico mezzo possibile per raggiungere il Madagascar non poteva essere che il trasporto su «zattere» formate da resti intricati di vegetazione, attraverso il canale di Mozambico. Una volta giunti a terra i lemuri primitivi avrebbero trovato un'incredibile varietà di opportunità ecologiche su un'isola la cui superficie è quasi due volte quella dell'Italia ed è oltremodo diversificata per topografia, clima e ambienti.

L'isola di Madagascar assomiglia un po' a una gigantesca impronta di piede sinistro nel mare, con l'asse maggiore orientato più o meno in direzione nord-sud. Si estende da circa 12 gradi di latitudine sud fin sotto il tropico del Capricorno. Il lato orientale dell'isola presenta una ripida scarpata battuta dagli alisei (i venti dominanti); qui le precipitazioni, abbondanti tutto l'anno, favoriscono la crescita rigogliosa della foresta pluviale. Verso ovest, un altopiano centrale accidentato degrada dolcemente verso le ampie pianure costiere che diventano via via più aride procedendo verso sud. Nel nord-ovest la foresta pluviale lascia in gran parte il posto a foreste decidue e a boscaglie che, nell'estremo sud, vengono sostituite da una flora straordinaria, adattata al clima desertico, dove il 98 per cento delle specie è endemico. A queste regioni principali si aggiunge una serie di microclimi locali e di strutture geomorfologiche secondarie che danno origine a un assortimento senza precedenti di ambienti favorevoli ai mammiferi che vivono nella foresta.

Nessuno sa quale gamma di habitat ci fosse in Madagascar nelle lontane epoche in cui cominciarono ad arrivare i primati e quali esseri viventi occupassero quegli habitat. Manca la documentazione fossile. Quel che è certo è che là i primati ebbero successo e che all'arrivo dell'uomo, circa 2000 anni fa, l'isola era popolata da almeno 45 specie di lemuri. Questi primati avevano dimensioni e peso corporeo variabili dai 60 grammi del lemure-topo, *Microcebus*, agli oltre 180 chilogrammi (la taglia di un grosso gorilla) dell'*Archaeoindris*.

I lemuri sono primati inferiori e appartengono, come il galagone, il potto e il lori, al sottordine strepsirrini. L'uomo, invece, è un primate superiore e appartiene, come i callitricidi, i cebidi, i cercopitecidi, gli ilobatidi e i pongidi, al sottordine antropoidei. Gli studiosi non sono d'accordo su quale sia il gruppo d'appartenenza del piccolo ed enigmatico tarsio dell'Asia sudorientale. La distinzione fra primati inferiori e superiori è in effetti un concetto piuttosto arcaico che sta passando di moda, ma in questo contesto ci torna utile.

I primati superiori sono apparsi sulla scena evolutiva molto più tardi dei primati inferiori, e da uno di essi, probabilmente, hanno preso origine sul finire

Il sifaka di Coquerel vive nella foresta del Madagascar nordoccidentale. Questo primate inferiore si è evoluto da lemuri ancestrali che probabilmente hanno attraversato il canale di Mozambico su «zattere» di vegetazione molto tempo dopo il distacco del Madagascar dall'Africa. L'isola, lunga oltre 1600 chilometri, è a 400 chilometri circa dalla costa.

LEMURE-TOPO (*Microcebus rufus*)

CATTA (*Lemur catta*)

LEMURE DORATO DEI BAMBÙ (*Hapalemur aureus*)

SIFAKA DI VERREAUX, VARIANTE DI FORSYTH MAJOR (*Propithecus verreauxi verreauxi*)

LEMURE CORONATO, FEMMINA* (*Eulemur coronatus*)
* Viene indicato il sesso se maschio e femmina differiscono per il colore

SIFAKA DI VERREAUX (*Propithecus verreauxi verreauxi*)

dell'Eocene. I lemuri del Madagascar e i loro cugini continentali mostrano molti tratti in comune con le forme dell'Eocene, mantenendo una serie di caratteristiche fisiche che i primati superiori hanno perso. Soltanto in Madagascar, però, troviamo ancora primati inferiori ad attività diurna. Quasi tutti gli attuali primati superiori sono diurni e in termini paleontologici è accertato che tutti gli antropoidei derivano da un antenato comune di abitudini diurne. Perciò, se tra i primati di oggi vogliamo trovare richiami ai nostri antenati del lontano Eocene, dobbiamo rivolgerci a quelli del Madagascar.

Gli attuali primati inferiori e superiori si distinguono per alcuni caratteri strutturali, riguardanti soprattutto il sistema nervoso e gli organi di senso. I primati inferiori hanno un cervello molto più piccolo dei primati superiori in rapporto alla dimensione corporea. Differiscono anche nello sviluppo delle aree di associazione che controllano la trasmissione dell'informazione tra i diversi centri cerebrali.

Vi sono differenze anche per quanto riguarda le funzioni visive e olfattive. Sebbene gli occhi dei primati inferiori siano completamente diretti in avanti, i campi visivi sinistro e destro si sovrappongono meno di quanto avviene nei primati superiori. Questa disposizione limita la percezione della profondità alla sola zona centrale del campo visivo. E se è naturale che nella retina dei primati inferiori notturni manchino i coni che sono sensibili ai colori, il poco che sappiamo sulla discriminazione visiva nei lemuri diurni basta a farci pensare che essa sia quantomeno limitata.

Quanto all'olfatto, i primati inferiori presentano cavità nasali più ampie dei primati superiori, con strutture interne più complesse. I primati inferiori attuali conservano la primitiva regione nasale umida dei mammiferi, il *rhinarium*, che fa parte di un sistema per il trasferimento di particelle alla cavità nasale, dove queste vengono analizzate da un organo che nella maggior parte dei primati superiori è tutt'al più vestigiale.

Numerosi primati inferiori e solo alcune scimmie sudamericane fra i primati superiori possiedono ghiandole odorifere per marcare il territorio, un mezzo importante di comunicazione tra individui. I segnali visivi sono meno importanti: le facce dei primati inferiori non hanno la muscolatura necessaria a produrre quelle espressioni complesse mediante le quali i primati superiori comunicano i propri stati d'animo.

In generale i primati attuali hanno perso gli unghioni primitivi che servivano ai loro antenati pre-eocenici per arrampicarsi sugli alberi, non avendo capacità prensili. Al posto degli unghioni dispongono di un primo dito, staccato dagli altri e ora, almeno in parte, opponibile a essi, e di cuscinetti dotati di sensibilità tattile posti sotto la punta delle dita, munite dorsalmente di unghie piatte. Questo fondamentale cambiamento evolutivo ha avuto conseguenze che vanno ben oltre la locomozione in quanto ha reso possibile anche la manipolazione. Ma, mentre i primati superiori manipolano generalmente gli oggetti portando il pollice in opposizione alle altre dita, i lemuri tendono a raccogliere gli oggetti con l'intera mano. Diventa allora probabile che un oggetto tenuto in questo modo venga rigirato più volte tra le dita e annusato piuttosto che esaminato con la vista.

Naturalmente, primati inferiori e superiori appartengono a gruppi profondamente diversi, i cui membri presentano, rispetto alle caratteristiche delineate sopra, un'ampia variabilità. Tuttavia i primati inferiori sono senza dubbio più primitivi dei primati superiori, nel senso che sono più simili ai comuni antenati da cui sono derivati entrambi i gruppi. Sebbene limitati ad alcune ossa e denti, i fossili rivelano chiaramente che nell'Eocene il cervello dei primati in rapporto alla dimensione corporea era più piccolo di quello dei lemuri attuali e che la vista non aveva raggiunto un netto predominio sull'olfatto, come si osserva nei primati superiori attuali. Le mani e i piedi del primate eocenico erano certamente capaci di afferrare, ma con ogni probabilità non riuscivano a manipolare gli oggetti in modo più preciso di quanto facciano i lemuri attuali. In altre parole, come manipolatori, i primati dell'Eocene non erano presumibilmente troppo diversi dai lemuri attuali. Anzi, erano così simili che, studiando le abitudini dei lemuri, possiamo avere un'idea delle potenzialità comportamentali dei primati eocenici dalle quali, alla fine, si sono sviluppate le nostre tanto vantate capacità umane.

Non vi sono, sul comportamento dei lemuri, lavori antecedenti agli anni sessanta, quando vennero intraprese in Madagascar le prime ricerche sul campo, i cui risultati si sono rivelati sempre più in accordo con le previsioni. Per e-

LEMURE MACACO, FEMMINA (*Eulemur macaco macaco*)

SIFAKA DI TATTERSALL (*Propithecus tattersalli*)

VARI (*Varecia variegata rubra*)

LEMURE MACACO, MASCHIO (*Eulemur macaco macaco*)

LEMURE MONGOZ, FEMMINA E PICCOLO (*Eulemur mongoz*)

LEMURE MACACO, FEMMINA E PICCOLO (*Eulemur macaco flavifrons*)

sempio, pensando al lemure come modello ancestrale, l'interpretazione delle osservazioni è molto semplice: i lemuri infatti mostrano una gamma di modelli comportamentali relativamente stereotipati, simili a quelli esibiti dai primati più antichi e dai quali i primati superiori sono riusciti a emanciparsi. Ma forse la scoperta più incredibile ottenuta attraverso gli studi sul campo riguarda l'estrema diversità riscontrata fra i lemuri in quanto ad abitudini di vita.

Naturalmente, certe previsioni basate sugli studi anatomici sono state effettivamente confermate. Si è dimostrato che la marcatura con sostanze odorose, come urina, feci e secrezioni di ghiandole specializzate, è una componente significativa del comportamento dei lemuri e, a giudicare dalla sua diffusione tra i mammiferi attuali, deve essere senz'altro un comportamento molto antico che può aver avuto una notevole importanza per la comunicazione tra i primati dell'Eocene.

Come ci si attendeva, risultò anche che i lemuri hanno la tendenza a esplorare l'ambiente con il naso, basandosi, per esempio, sull'olfatto, e non sulla vista, per individuare i frutti maturi. Senza dubbio l'olfatto è della massima importanza per tutti i componenti delle cinque famiglie attuali di lemuri, come lo è stato per i loro antenati dell'Eocene, e molto più di quanto non lo sia per la maggior parte dei primati superiori. Si può applicare il ragionamento inverso alla vista? Chiunque abbia osservato un sifaka muoversi nella foresta potrebbe concludere che l'animale è un po' svantaggiato, in quanto non possiede un sistema visivo efficiente come quello di un primate superiore.

In effetti risulta che i lemuri sono diversi quanto o persino più dei primati superiori per quanto riguarda la maggior parte degli aspetti comportamentali ed ecologici. La loro dieta, per esempio, comprende più o meno gli stessi cibi dei primati superiori: frutti, fiori, foglie, germogli e insetti. Si sta osservando sempre più spesso, tuttavia, che i lemuri si cibano di nettare, cosa invece insolita nei primati superiori. Nell'insieme tendono ad avere una dieta molto varia, tranne alcuni che sono al riguardo altamente specializzati, come, per esempio, i lemuri dei bambù, e anche gli appartenenti alla specie *Hapalemur aureus*: pesano meno di un chilogrammo e si cibano quotidianamente di germogli che contengono una quantità di acido cianidrico sufficiente a uccidere cinque o sei persone.

Analogamente, i lemuri abitano quasi tutti i tipi di vegetazione sfruttati dai primati superiori, dalla foresta pluviale alla boscaglia arida. Inoltre, mentre quasi tutti i primati superiori hanno abitudini diurne, alcuni lemuri sono notturni, altri diurni e altri ancora catemerali, cioè sono attivi soprattutto al crepuscolo.

Fra i lemuri vi è un'estrema varietà di organizzazione sociale. Alcuni conducono vita pressoché solitaria, con i piccoli territori delle femmine che si sovrappongono a quelli più grandi dei maschi. In certe specie, coppie di adulti allevano la prole, mentre in altre piccoli gruppi consistono solo di qualche adulto di entrambi i sessi. Altre specie ancora vivono in gruppi continuamente variabili o in nuclei più grandi e stabili, costituiti da una ventina o più di individui.

All'interno di queste categorie principali si osservano ulteriori varianti. Forse è ancor più sorprendente che persino nell'ambito della stessa specie si possano trovare da un luogo all'altro sostanziali differenze di organizzazione sociale. L'aspetto più significativo consiste nel fatto che il cervello dei lemuri, benché tenda a essere più piccolo di quello dei primati superiori, consente almeno ad alcuni lemuri di organizzare quella complessa socialità che di solito riteniamo prerogativa dei primati superiori.

Il quadro della varietà comportamentale dei lemuri, quale inizia a delinearsi, ha importanti implicazioni per la comprensione dei nostri antenati eocenici. Nonostante la conservazione di caratteri comportamentali primitivi come la marcatura con sostanze odorose, l'ampia varietà dei comportamenti fa pensare che sin dall'inizio, ben prima dell'aumento delle dimensioni del cervello che caratterizza i primati superiori, i primati abbiano acquisito una flessibilità di comportamenti e un'adattabilità capaci di smentire il pregiudizio di «primitività» cui sarebbe portata la maggior parte di noi di fronte alla descrizione di queste prime forme. Queste caratteristiche comportamentali sono, secondo la mia opinione, la principale eredità evolutiva dei primati, qualcosa di molto più importante di qualsiasi caratteristica anatomica che siamo portati a considerare. Come primati superiori tendiamo a chiederci perché i lemuri non si siano evoluti ulteriormente nella nostra direzione. In questo modo, però, perdiamo di vista il nocciolo della questione: nel loro complesso i lemuri hanno effettivamente ereditato dai loro antenati dell'Eocene le più importanti caratteristiche dei primati, così come noi stessi abbiamo fatto dai nostri antenati.

Guardando questo quadro da un'altra prospettiva è senza dubbio chiaro come i lemuri non abbiano avuto bisogno delle caratteristiche fisiche dei primati superiori per utilizzare le diverse opportunità ecologiche che il Madagascar offriva loro. Forse questo aspetto è messo meglio in evidenza se si considera tutta la gamma di specie di lemuri presenti in Madagascar quando i primi uomini misero piede sull'isola. La diversità attuale è impressionante: a un estremo il piccolo lemure-topo che pesa poco più di 50 grammi e all'altro estremo l'indri (o babakoto) di quasi sette chilogrammi. Ma all'origine l'isola era abitata da un numero elevato di specie di primati, pari, se non addirittura superiore, all'intera gamma di specie raggiunta dagli antropoidei nel resto del mondo.

Scavi effettuati verso la fine del XIX secolo in diverse località dell'altopiano centrale del Madagascar hanno portato alla luce i resti subfossili, ossia parzialmente fossilizzati, ma comunque non molto antichi, di lemuri estinti di grosse dimensioni. Si conoscono almeno 15 specie subfossili, che appartengono a otto o forse più generi diversi. Sono tutti più grossi di qualsiasi lemure vivente. La stessa caratteristica (grandi dimensioni) si ritrova tra gli esemplari non primati della fauna subfossile che include l'«uccello elefante», *Aepyornis maximus* (il più grosso uccello mai vissuto, presumibilmente del peso di circa mezza tonnellata), l'ippopotamo pigmeo e la tartaruga gigante.

Numerosi e continuati studi hanno messo in luce, per quanto riguarda i lemuri subfossili, una gamma straordinaria di tipi di locomozione e postura. A questo proposito i lemuri attuali presentano una grande varietà, che si manifesta dall'andatura quadrupede veloce e scattante del piccolo *Microcebus* agli spettacolari salti degli indridi dalle lunghe zampe (sifaka, indri e simili). Si può senz'altro dire che nessuno dei lemuri attuali sia escluso da uno qualsiasi degli ambienti forestali a causa delle sue specializzazioni anatomiche locomotorie, ma è vero in generale che la maggior parte delle specie evita di passare molto tempo sul terreno. L'unica eccezione di rilievo è il catta, *Lemur catta*, dalla caratteristica coda ad anelli bianchi e neri.

D'altra parte, fra i lemuri estinti esisteva un gruppo sicuramente adattato alla vita sul terreno. È la famiglia degli archeolemuridi che comprende i due generi di media taglia *Archaeolemur* e *Hadropithecus*. Laurie R. Godfrey dell'Università del Massachusetts ad Amherst (che ci ha fornito tutte le stime qui riportate relative al peso corporeo dei subfossili) ha valutato che il peso delle diverse specie di archeolemuridi fosse compreso tra 15 e 25 chilogrammi.

Questi lemuri di mole piuttosto massiccia erano i parenti a zampe corte degli indridi e avevano una dentatura altamente specializzata. Clifford J. Jolly della New York University li ha confrontati, rispettivamente, con due primati superiori africani, il babbuino comune e il gelada. Il babbuino comune è un animale estremamente adattabile, che vive nelle foreste, anche decidue, oltre che nelle savane dove è molto comune. Il gelada è adattato in modo specifico alle regioni montuose prive di alberi dell'Etiopia e la sua alimentazione è composta quasi esclusivamente di erbe, bulbi e radici. Sia la dentatura di *Hadropithecus* sia ciò che è noto del suo scheletro fanno pensare che questo lemure avesse analoghe preferenze in fatto di dieta e di habitat.

Un altro indride affine estinto mostra-

I lemuri estinti comprendono *Archaeolemur* (*i due esemplari sul terreno*), *Megaladapis* (*in alto a sinistra*) e *Palaeopropithecus* (*in alto a destra*). *Archaeolemur* aveva all'incirca le dimensioni di una femmina di babbuino ed era adattato alla vita sul terreno. Al contrario, *Megaladapis*, che pesava circa 80 chilogrammi, era arboricolo e forse presentava adattamenti simili a quelli del koala australiano. *Palaeopropithecus*, che pesava al massimo 60 chilogrammi, era un arboricolo simile al bradipo. Queste ricostruzioni - effettuate con la consulenza di Laurie R. Godfrey dell'Università del Massachusetts ad Amherst - sono basate su fossili portati alla luce alla fine del secolo scorso. Gli scavi hanno restituito scheletri, per lo più incompleti, di almeno 15 specie di lemuri estinti, appartenenti a circa otto generi.

va una serie di adattamenti completamente diversi. Per trovare analogie si deve però guardare ben oltre i primati. *Palaeopropithecus* comprendeva almeno due specie con un peso compreso tra 40 e 60 chilogrammi. Ross MacPhee, mio collega all'American Museum of Natural History, ha analizzato uno scheletro quasi completo, rinvenuto nel Madagascar settentrionale alcuni anni fa, e ne ha dedotto che appartenesse a un organismo con movimenti generalmente lenti, che rimaneva appeso ai rami come un bradipo, e che era, in definitiva, più forte che massiccio. Il suo parente ancor più robusto, *Archaeoindris*, (che probabilmente pesava oltre 180 chilogrammi) è poco noto, ma Martine Vuillaume-Randriamanantena dell'Università del Madagascar pensa che fosse un quadrupede terrestre abbastanza simile ai bradipi estinti del Nuovo Mondo. Entrambe queste forme mostravano specializzazioni del cranio, in particolare nell'area del naso, che non hanno riscontro nei primati viventi.

Anche per trovare qualcosa di analogo al ben noto lemure subfossile *Megaladapis* dobbiamo guardare al di fuori dell'ordine dei primati. Le tre specie con peso compreso tra 40 e 80 chilogrammi sono state descritte da Alan C. Walker della Johns Hopkins School of Medicine come le più simili per locomozione al koala, un marsupiale australiano. Come il koala questi lemuri si arrampicavano lentamente, presumibilmente preferendo supporti verticali, e non erano buoni saltatori. Diverse specializzazioni del cranio possono aver compensato tali limitazioni di movimento, permettendo all'animale di cibarsi in un raggio esteso attorno a una posizione fissa.

La località più famosa per i lemuri estinti è Ampasambazimba negli altopiani del Madagascar centrale. Le 14 specie di primati (inclusi lemuri estinti e attuali) di cui sono state recuperate le ossa reggono bene per abbondanza il confronto con quelle rinvenute in ogni altra località del mondo in cui siano stati trovati dei primati. Ma Ampasambazimba si trova al centro di quello che oggi è un altopiano essenzialmente privo di alberi. Come può vantare una fauna forestale così ricca ed eterogenea?

Gli studi che risalgono all'inizio di questo secolo sembravano fornire la risposta. Prima dell'arrivo dell'uomo, il Madagascar era quasi completamente coperto da foreste. Il fatto che oggi sopravvivano solo chiazze di foresta è stato spiegato con la tendenza dei primi coloni a incendiare vaste zone di foresta per ottenere aree da pascolo per il bestiame e terra coltivabile. Purtroppo questo metodo viene diffusamente impiegato anche ai nostri giorni.

Secondo questa ipotesi la perdita di habitat deve aver avuto un ruolo quanto meno notevole nella scomparsa di uccelli e mammiferi di grossa taglia. C'è stato anche un risvolto selettivo in queste estinzioni: i lemuri scomparsi erano di grossa taglia e perciò costituivano ambite e facili prede per i cacciatori. Presumibilmente si riproducevano con più lentezza delle piccole forme sopravvissute. Sembra convincente, come causa di estinzione, la tesi di un'azione combinata diretta e indiretta dell'uomo.

Anche il cambiamento climatico è stato chiamato in causa come agente di estinzione, inizialmente perché molti siti di ritrovamento di reperti subfossili si trovano in corrispondenza di laghi e paludi prosciugati. Come spiegazione globale delle estinzioni quella che chiamava in causa il disseccamento non è stata mai del tutto convincente. Tuttavia, l'interesse verso una possibile causa climatica è stato alimentato di recente dalla dimostrazione che alcune praterie del Madagascar centrale sono antiche, certamente preumane.

Le analisi di carotaggi lacustri effettuate da David A. Burney della Fordham University hanno evidenziato che, come ogni altra area della Terra, il Madagascar ha subito fluttuazioni climatiche nelle ultime migliaia di anni. Alla fine dell'ultima glaciazione, circa 10 000 anni fa, le foreste del Madagascar hanno iniziato a riespandersi dopo un periodo di arretramento. Non sorprende quindi che, all'arrivo in Madagascar dei primi uomini, gli altopiani centrali non fossero completamente ricoperti da foreste.

Il cambiamento climatico e la conseguente riduzione e ridistribuzione delle foreste costituiscono quindi un possibile fattore della scomparsa nel Madagascar della fauna subfossile. È però verosimile che qui, come altrove, si siano sempre verificate perturbazioni periodiche di questo tipo. Le linee ancestrali dei lemuri estinti sono chiaramente sopravvissute a queste antiche vicissitudini e non c'è motivo di credere che il più recente ciclo di cambiamenti climatici (piuttosto lievi) abbia avuto un effetto fatale contemporaneamente su diverse linee evolutive. Ciò vale soprattutto se si considera che l'ecologia della maggior parte dei lemuri subfossili era probabilmente assai ampia e diversificata. Fra gli altri, *Megaladapis, Palaeopropithecus* e *Archaeolemur* vivevano in ambienti sia umidi sia aridi ed erano sicuramente molto adattabili riguardo alla scelta dell'habitat. Quindi, deve essere chiamato in causa qualcosa di diverso da un semplice ciclo di perturbazioni naturali per spiegare la scomparsa dei grossi lemuri. Il solo fattore veramente nuovo che è entrato in gioco è stato *Homo sapiens*.

Habitat del Madagascar

L'isola di Madagascar offre una varietà estremamente ampia di ambienti: foreste pluviali rigogliose, foreste decidue, deserti e pianure costiere. La pressione antropica e la disperata povertà della popolazione hanno contribuito alla deforestazione. Per esempio, nel 1985 la foresta lungo la costa orientale risultava ridotta del 66 per cento rispetto alla sua estensione di inizio secolo.

ESTENSIONE DELLA FORESTA ORIENTALE NEL 1900
PRATERIA
FORESTA PLUVIALE
FORESTA SECONDARIA UMIDA
FORESTA MONTANA
FORESTA DECIDUA
BOSCAGLIA ARIDA

FONTI: Glen M. Green, Robert W. Sussman, H. Humbert e G. Cours Darne

L'uso di tagliare e bruciare le foreste per fare spazio a colture agricole si impose fin dai tempi dell'arrivo in Madagascar dei primi coloni, circa 2000 anni fa, mentre la deforestazione estensiva per ricavare legname ha provocato l'erosione di molti versanti. La scomparsa di molti habitat ha così contribuito all'estinzione di uccelli e mammiferi di grossa taglia.

Parlare di un «evento di estinzione» dei lemuri di grossa taglia implicherebbe un processo ormai concluso. Ma non è così. I lemuri estinti e attuali fanno parte di un processo che continua. Finora i lemuri più piccoli e più agili sono sopravvissuti, ma rimangono minacciati dalla crescente espansione della popolazione umana. Il tributo che essi pagano alla caccia aumenta con il numero degli uomini e l'uso di armi sempre più perfezionate. Un'altra importante considerazione riguarda i movimenti demografici che tendono a erodere le pratiche e le credenze locali che tradizionalmente proteggevano varie specie di lemuri.

Ancora più preoccupante è la distruzione degli habitat, dovuta soprattutto al taglio e all'incendio degli alberi per ottenere terreno da destinare all'agricoltura, legna da ardere e legname da vendere. In Madagascar il tratto continuo più esteso di foresta si trova lungo l'umida scarpata orientale. Dall'analisi dei documenti storici e delle immagini da satellite, Glen M. Green e Robert W. Sussman della Washington University hanno dimostrato che tra l'inizio del secolo e il 1985 era andato distrutto il 66 per cento dell'area ricoperta da foresta. Essi ritengono che fra 35 anni solo i pendii più scoscesi della scarpata saranno ancora ricoperti di alberi. Nelle zone occidentali e meridionali più pianeggianti dell'isola, la rapidità di distruzione della foresta è probabilmente maggiore.

Queste pressioni esistono da molti decenni. In Madagascar, negli anni venti, le autorità coloniali hanno istituito uno dei primi sistemi di riserve naturali del globo. Essendo però fra i paesi più poveri del mondo, il Madagascar, nonostante l'interessamento del Governo, non può permettersi di sorvegliare adeguatamente queste riserve e, in alcuni casi, non ci riesce affatto. Per fortuna, negli ultimi anni l'isola ha richiamato l'attenzione della comunità internazionale interessata alla conservazione. Il paese inoltre è comparso di recente in una delle prime cosiddette «conversioni di debito in natura» nelle quali parte del debito nei confronti dell'estero viene estinta in cambio della protezione di aree naturali.

Ovviamente sono soprattutto le necessità reali e immediate delle comunità locali, disperatamente povere, a scontrarsi con le esigenze di conservazione della foresta. In molti casi gli accordi internazionali per la tutela dell'ambiente devono ancora essere trasmessi dalle più alte sfere governative alle istituzioni che operano sul territorio, ma ciò non toglie che si possa sperare nell'arresto del degrado e forse anche, sul lungo termine, in un miglioramento della situazione ambientale del Madagascar.

Nel frattempo la popolazione dei lemuri continua a ridursi. È tragico veder scomparire la biodiversità in ogni parte del mondo, ma la tragedia è particolarmente grave nel caso dei lemuri del Madagascar, che avrebbero ancora molto da insegnarci sul nostro passato.

BIBLIOGRAFIA

JOLLY ALISON, *A World Like Our Own: Man and Nature in Madagascar*, Yale University Press, 1980.

TATTERSALL IAN, *The Primates of Madagascar*, Columbia University Press, 1982.

MACPHEE R. D. E., *Environment, Extinction, and Holocene Vertebrate Localities in Southern Madagascar* in «National Geographic Research», 2, n. 4, autunno 1986.

WRIGHT PATRICIA C., *Lemurs Lost and Found* in «Natural History», 97, n. 7, luglio 1988.

JOLLY ALISON, *Madagascar's Lemurs: On the Edge of Survival* in «National Geographic», 174, n. 2, agosto 1988.

PRESTON-MAFHAM KEN, *Madagascar: A Natural History*, Facts on File, 1991.

Punti quantici

La tecnologia nanometrica è oggi in grado di confinare gli elettroni in strutture puntiformi, ottenendo «atomi su misura» che potrebbero essere impiegati per realizzare nuovi dispositivi elettronici e ottici

di Mark A. Reed

Negli ultimi anni la ricerca sui semiconduttori ha assunto letteralmente dimensioni nuove, i cui numeri sono due, uno e zero. In dispositivi messi a punto recentemente gli elettroni possono essere confinati in piani, rette o punti matematici, i cosiddetti punti quantici.

I costruttori di microchip hanno ideato tutta una serie di tecniche di nanofabbricazione con le quali si possono creare strutture quasi atomo per atomo. Via via che si ottengono e si studiano i corrispettivi artificiali di atomi, molecole e cristalli, queste tecniche schiudono un nuovo dominio della fisica e della chimica teoriche: gli sperimentatori non sono più limitati dalle forme, dalle dimensioni e dalle distribuzioni di carica degli atomi presenti in natura.

Oltre a preannunciare straordinarie possibilità scientifiche, i punti quantici sembrano avere proprietà che potrebbero essere sfruttate in molte applicazioni elettroniche e ottiche. Schiere di punti fittamente stipati potrebbero costituire il substrato di calcolatori di potenza inaudita; con essi si potrebbero ottenere materiali capaci di assorbire ed emettere luce a qualunque insieme di frequenze desiderato o realizzare laser a semiconduttore più efficienti e più accuratamente sintonizzati di quelli oggi esistenti.

Piani, rette e punti sono enti matematici che non hanno estensione fisica. Com'è possibile realizzarli in un materiale reale tridimensionale? La risposta è offerta dalla meccanica quantistica e dal principio di indeterminazione di Heisenberg. Non è possibile conoscere contemporaneamente con precisione arbitraria la posizione e la quantità di moto di un oggetto microscopico (per esempio un elettrone): quanto più un elettrone è localizzato, tanto più la sua quantità di moto è indeterminata. Questo intervallo più ampio di valori della quantità di moto si traduce in una energia media più elevata. Se un elettrone fosse confinato in uno strato infinitamente sottile, anche la sua energia sarebbe infinita.

In generale, in un semiconduttore l'energia degli elettroni è limitata dalla loro temperatura e dalle proprietà del materiale. Tuttavia, se gli elettroni sono confinati in uno strato abbastanza sottile, i vincoli imposti dal principio di indeterminazione prevalgono su altre considerazioni. Fintanto che non dispongono di un'energia sufficiente per sfuggire al confinamento, gli elettroni sono in effetti bidimensionali.

Quest'espressione non è una semplice approssimazione: di fatto gli elettroni confinati in un piano non hanno libertà di movimento nella terza dimensione; quelli confinati in un filo quantico hanno un solo grado di libertà; quelli confinati in un punto quantico non ne hanno alcuno. Nei semiconduttori ordinari, la lunghezza d'onda caratteristica di un elettrone di conduzione libero è di circa 10 nanometri: un elettrone contenuto in un cubo di materiale semiconduttore con uno spigolo di 10 nanometri è sostanzialmente confinato in un punto.

La progettazione vera e propria di semiconduttori con meno di tre dimensioni cominciò a partire dall'inizio degli anni settanta, quando due gruppi, degli AT&T Bell Laboratories e della IBM, costruirono i primi «pozzi quantici» bidimensionali. Queste strutture, realizzate con tecniche di deposizione di pellicole sottili che consentono di costruire un semiconduttore uno strato atomico alla volta, sono sottili regioni di materiale semiconduttore (di solito arseniuro di gallio e composti affini) che attraggono gli elettroni. L'energia degli elettroni all'interno del pozzo è inferiore a quella degli elettroni all'esterno, i quali perciò vi affluiscono come acqua che scende a riempire un pozzo profondo.

Oltre ai pozzi quantici si possono costruire anche barriere quantiche, ossia «colline» bidimensionali che respingono gli elettroni. Combinando pozzi e barriere è possibile realizzare complesse strutture che fino a poco tempo fa esistevano soltanto come esempi nei testi di meccanica quantistica (si veda l'articolo *Materiali a dimensione zero?* di Elizabeth Corcoran in «Le Scienze» n. 269, gennaio 1991).

Oggi i pozzi quantici sono molto diffusi. Costituiscono la base dei diodi laser presenti nei lettori di compact disc e dei sensibilissimi ricevitori di microonde che captano i segnali emessi dalle antenne dei satelliti. Intanto si è riusciti a confinare gli elettroni non solo in un piano, ma anche in un punto.

Le prime indicazioni sulla possibilità di confinamento quantico in zero dimensioni si ebbero all'inizio degli anni ottanta, quando A. I. Ekimov e colleghi dell'Istituto Ioffe di fisica tecnica di Leningrado (ora San Pietroburgo) notarono che campioni di vetro contenenti i semiconduttori solfuro di cadmio o seleniuro di cadmio davano uno spettro ottico insolito. I campioni erano stati portati ad alta temperatura: Ekimov avanzò l'ipotesi che il riscaldamento avesse fatto precipitare nel vetro nanocristalliti di semiconduttore e che il confinamento quantico degli elettroni in questi cristalliti causasse quel comportamento ottico.

Per comprendere questo ragionamento, immaginiamo un elettrone racchiuso in un contenitore. Secondo la meccanica quantistica, l'elettrone possiede le proprietà di un'onda, come le increspature dell'acqua o le vibrazioni di una corda di violino. Quest'ultima è fissata alle sue estremità, così come l'onda dell'elettrone è limitata dalle pareti del recipiente. La lunghezza d'onda delle vibrazioni della corda (o dell'elettrone) deve perciò adattarsi a questi confini (*si veda l'illustrazione a pagina 75*).

Nel caso della corda di violino, uno dei punti in cui essa è fissata varia al variare della posizione delle dita del violinista lungo il manico. Se la lunghezza del tratto di corda che può vibrare diminuisce, la frequenza delle vibrazioni della corda aumenta, così come quella delle sue armoniche. Se le dimensioni del recipiente in cui l'elettrone è confinato diminuiscono, il più basso livello energetico dell'elettrone (che corrisponde all'armonica fondamentale della corda di violino) aumenta. Per i nanocristalliti di semiconduttore, questo valore è l'energia di soglia per l'assorbimento ottico e le armoniche corrispondono a nuovi picchi di assorbimento a energie più alte.

Quanto dev'essere piccolo un nanocristallite perché questo fenomeno sia osservabile? Nel vuoto gli effetti del confinamento comincerebbero a manifestarsi quando l'elettrone fosse confinato in un volume di circa 1 nanometro di diametro, che corrisponde a una lunghezza dell'onda elettronica di 2 nanometri e quindi a un'energia di circa un quarantesimo di elettronvolt.

Qui la fisica dei semiconduttori viene in soccorso della tecnologia nanometrica. La lunghezza d'onda di un elettrone dipende dalla sua energia e dalla sua massa. Per una lunghezza d'onda data, quanto minore è la massa tanto maggiore è l'energia e quindi tanto più facile è osservare la variazione di energia causata dal confinamento. I potenziali elettrostatici degli atomi del reticolo cristallino si sovrappongono, creando un mezzo in cui le onde elettroniche si propagano con inerzia minore che nello spazio vuoto. La «massa efficace» dell'elettrone è quindi minore della sua massa reale. Nell'arseniuro di gallio la massa efficace è circa il 7 per cento di quella che si avrebbe nel vuoto, e nel silicio è il 14 per cento; di conseguenza il confinamento quantico nei semiconduttori si presenta in volumi del diametro di circa 10 nanometri.

La soglia di assorbimento ottico per i nanocristalliti di questa grandezza si sposta verso energie più alte (cioè si allontana dall'estremità rossa dello spettro) via via che il cristallite diviene più piccolo. Questo effetto si presenta con la massima eleganza negli aggregati di seleniuro di cadmio: il passaggio dal rosso cupo all'arancione al giallo via via che il diametro dell'aggregato diminuisce si può osservare nettamente a occhio nudo. (Un problema curioso e ancora non ri-

Il confinamento quantico è responsabile dei colori di questi cristalliti di seleniuro di cadmio, ciascuno del diametro di pochi nanometri, sintetizzati da Michael L. Steigerwald degli AT&T Bell Laboratories. Gli elettroni contenuti nei frammenti di semiconduttore diffondono fotoni di energia inferiore a un valore di soglia determinato dalle dimensioni del cristallite e assorbono quelli di energia superiore. I cristalliti più grandi assorbono fotoni di energia più bassa e quindi appaiono rossi, mentre i più piccoli assorbono solo quanti di energia più elevata e quindi appaiono gialli.

solto è che cosa accadrebbe quando il cristallite fosse così piccolo - meno di 1 nanometro di diametro - da rendere privo di senso il concetto di massa efficace. Punti quantici così piccoli non sono stati ancora costruiti.)

L'ipotesi di Ekimov si dimostrò corretta, ma ci vollero anni perché ricercatori della Corning Glass, della IBM, del City College di New York e altri ancora individuassero le giuste tecniche di preparazione del vetro e dimostrassero in modo convincente il confinamento quantico. Nel frattempo, ai Bell Laboratories, Louis E. Brus e collaboratori preparavano sospensioni colloidali di nanocristalliti facendoli precipitare da soluzioni contenenti gli elementi che costituiscono i semiconduttori.

Questi cristalliti crescono per accumulo di singoli ioni, finché la riserva si esaurisce o viene allontanata. Così, arrestando la precipitazione dopo un certo tempo, Brus e colleghi potevano regolare le dimensioni delle particelle di precipitato in un intervallo compreso tra 1,5 e circa 50 nanometri. Nell'ambito di uno stesso lotto, la grandezza delle particelle variava non più del 15 per cento. Come nel caso dei nanocristalliti incapsulati nel vetro, un cospicuo incremento dell'energia fondamentale di assorbimento segnalava il confinamento quantico.

Su questo metodo si sono basati ricercatori di molti laboratori in tutto il mondo. Per esempio A. Paul Alivisatos e colleghi dell'Università della California a Berkeley hanno ampliato la gamma degli elementi con cui si possono costruire i cristalliti. Oltre ai composti con elementi dei gruppi II B e VI A del sistema periodico (come, rispettivamente, cadmio e selenio), essi hanno precipitato anche composti, come l'arseniuro di gallio, con elementi dei gruppi III A e V A. Per stabilizzare la superficie dei minuscoli cristalli di semiconduttore, Michael L. Steigerwald dei Bell Laboratories e molti altri hanno impiegato un involucro organico a «bolla di sapone», o micella inversa. Alcuni gruppi dell'Università della California a Santa Barbara, dell'Università di Toronto e di altri centri, stipano aggregati atomici nelle cavità nanometriche delle zeoliti, una tecnica questa che consente un preciso controllo delle dimensioni.

Incapsulando i nanocristalli in un altro materiale si potrebbero migliorare di molto le loro prestazioni quantistiche. Le minuscole particelle di semiconduttore hanno un elevatissimo rapporto superficie-volume e in genere le loro superfici sono caratterizzate da atomi con legami chimici «in sospeso». Questi ultimi possono fungere da smorzatori e assorbire l'energia di elettroni che vibrino secondo modi di energia più elevata (ossia lunghezza d'onda più piccola). Di conseguenza molti nanocristalliti non manifestano la cospicua serie armonica di livelli energetici che ci si aspetterebbe da un punto quantico.

Costruire in dimensione zero

La costruzione dei punti quantici si svolge attraverso una serie di fasi di mascheratura e incisione. Dapprima un fascio di elettroni passa sulla superficie di un semiconduttore contenente uno strato sommerso di materiale del pozzo quantico (*1*). Dove il fascio ha tracciato una figura, il resist viene asportato (*2*). Sulla superficie risultante si deposita uno strato di metallo (*3*), poi un solvente asporta il resist rimanente, lasciando il metallo solo dove il resist è stato esposto al fascio elettronico (*4*). Ioni reattivi erodono il chip nelle zone non protette dal metallo (*5*), formando un punto quantico (*6*). Utilizzando un altro metodo di costruzione, si deposita una serie di elettrodi sopra uno strato sommerso di materiale del pozzo quantico. Quando agli elettrodi viene applicata una tensione, il campo elettrico risultante espelle gli elettroni dallo strato tranne che in certe piccole zone (*in alto a destra*). Il grado di confinamento quantico in queste zone può essere variato modificando la tensione agli elettrodi.

Verso la metà degli anni ottanta le difficoltà inerenti alla costruzione dei punti quantici a partire da aggregati atomici spinsero i ricercatori a studiare altri metodi di fabbricazione. Con i miei collaboratori della Texas Instruments a Dallas costruii nel 1987 i primi punti quantici con la tecnica litografica. Mediante metodi di incisione simili a quelli usati per fabbricare i circuiti integrati più avanzati, ricavammo minuscole colonne da fette di materiale adatto alla costruzione di pozzi quantici.

Per fabbricare colonne di 10 nanometri di lato si deve ricorrere alla litografia a fascio elettronico in luogo delle tecniche ottiche solitamente impiegate per la produzione di chip. Un fascio di elettroni scorre sulla superficie del semiconduttore, che è stata rivestita di un sottile strato polimerico detto resist. (Risultati analoghi si possono ottenere anche per mezzo di raggi X o fasci ionici.) Con una serie di operazioni si sostituisce il resist con un sottile strato di metallo nelle zone in cui è passato il fascio ad alta intensità. Mediante un gas reattivo si asporta poi il materiale non protetto, formando così le colonne. Con questa tecnica è facile costruire strutture di vari tipi aventi un diametro di non più di 100 nanometri, ma via via che si scende verso i 10 nanometri, che è il limite imposto dai resist più utilizzati, le difficoltà aumentano.

Sopra e sotto il materiale che costituisce il pozzo quantico, le colonne comprendono strati isolanti ultrasottili, seguiti da contatti conduttori. Gli elettroni sono confinati nel pozzo dagli strati isolanti per un tempo molto lungo, ma prima o poi riescono ad attraversarli per effetto tunnel, alimentando una debole corrente che può servire per misurare gli stati di energia interni del pozzo. Ogni volta che la tensione ai capi del pozzo coincide con l'energia di uno dei suoi stati di risonanza, l'intensità della corrente aumenta. Se il diametro della colonna è molto piccolo, lo spettro corrente-tensione presenta la serie armonica di picchi che contraddistingue il confinamento quantico. In effetti costruendo una sola colonna, isolata dall'ambiente circostante, si possono calcolare le proprietà di un singolo punto quantico, impresa che sarebbe assai difficile compiere con i nanocristalliti.

Inoltre, con il processo litografico di fabbricazione, il punto quantico viene rivestito e protetto naturalmente dagli effetti di superficie, almeno su due facce. Quella superiore e quella inferiore sono infatti interfacce a cristallo singolo costruite con tecniche avanzate di epitassia e sostanzialmente perfette. Poiché la colonna è conduttrice, i legami superficiali del semiconduttore da noi utilizzato formano una carica positiva rispetto al nucleo interno della colonna. Questa carica respinge gli elettroni dalla superficie verso l'interno, dove si ha il confinamento quantico; la regione da cui gli elettroni sono allontanati forma tutto intorno alla colonna una guaina isolante che protegge le facce laterali del punto. Quindi una colonna da 100 nanometri potrebbe contenere un punto quantico da 10 nanometri.

Un elettrone in una scatola è costretto ad avere una funzione d'onda quantistica che abbia valore nullo ai bordi della scatola. Il livello energetico minimo corrisponde a un'onda stazionaria con un singolo antinodo, il livello immediatamente superiore a un'onda con due antinodi e così via. L'energia dell'elettrone è inversamente proporzionale al quadrato della lunghezza d'onda, sicché i livelli energetici crescono rapidamente. Questa serie armonica di livelli energetici è la «firma» di un punto quantico.

La realizzazione di un punto quantico dipende dal fatto che la guaina isolante abbia spessore adeguato, e questo dipende a sua volta dalla grandezza della colonna. Quando facemmo i primi tentativi di fabbricare punti quantici nessuno sapeva quale fosse la dimensione giusta e i nostri sforzi fallirono. Ma il 20 agosto 1987, di primo mattino, mentre mi preparavo a presentare una comunicazione a un congresso sui dispositivi a pozzo quantico, i miei colleghi mi chiamarono per dirmi che erano riusciti a misurare un pozzo quantico. Corsi all'apparecchio per fax dell'albergo proprio in tempo per vedere stampati i dati, che mostravano una ricca serie armonica di livelli energetici degli elettroni. Un'ora dopo avevo riscritto il finale della mia comunicazione, il personale dell'albergo aveva ricavato un trasparente dal fax e potei comunicare la notizia.

Misurazioni successive confermarono che punti di dimensione diversa davano luogo a spettri armonici diversi, una chiara dimostrazione del confinamento quantico. In seguito questa stessa tecnica di fabbricazione è stata impiegata da gruppi del CNET in Francia, della NTT in Giappone, dell'Università di Cambridge, della State University of New York a Stony Brook e della Princeton University. Alla IBM di Zurigo, Pierre Gueret e collaboratori hanno addirittura costruito un punto «comprimibile» collocandovi intorno, con virtuosismo tecnologico, una porta elettronica. Aumentando la tensione alla porta, la grandezza del punto si riduce mentre crescono l'energia fondamentale e le armoniche dello spettro.

Il buon esito di queste misurazioni elettriche su punti quantici ottenuti per via litografica, rispetto alla relativa difficoltà delle misurazioni ottiche su punti costruiti a partire da aggregati atomici, ha messo in rilievo quanto sia importante tenere sotto controllo i dannosi effetti di superficie. Gruppi di ricerca dell'IBM, degli AT&T, delle Università di Amburgo e di Monaco di Baviera, del Politecnico di Delft, della Philips, di Cambridge, del Max-Planck-Institut für Festkörperforschung di Stoccarda e del MIT sono riusciti a eliminare del tutto gli effetti di superficie: in questi laboratori i punti quantici vengono fabbricati collocando minuscoli elettrodi porta sopra uno strato sommerso che confina gli elettroni in due dimensioni. Gli elettrodi comprimono gli elettroni in «isole» confinate per effetto quantico.

Uno dei vantaggi di questo metodo è che esso consente di collocare nel punto quantico un numero arbitrariamente piccolo o grande di elettroni, semplicemente variando la tensione di compressione. Ciò che si ottiene potrebbe essere definito un atomo su misura: la tensione di confinamento funge da nucleo che attrae elettroni e la valenza (o meglio il numero di elettroni) è determinata dalla tensione esterna della porta.

Negli atomi esistenti in natura il confinamento degli elettroni è prodotto dalla forza elettrostatica radiale del nucleo,

e le funzioni d'onda degli elettroni hanno simmetria radiale. Nei punti quantici la forma degli elettrodi porta determina l'intensità, la forma e la simmetria della tensione di confinamento, il che potrebbe un giorno consentire di studiare le proprietà fisiche di atomi inesistenti in natura, per esempio le funzioni d'onda e le configurazioni elettroniche di atomi quadrati o rettangolari.

Un gruppo del Max-Planck-Institut di Stoccarda e altri della IBM e degli AT&T hanno costruito grandi schiere periodiche di punti quantici fabbricando un elettrodo porta a griglia. La tensione applicata alla griglia forma nel materiale sottostante un reticolo regolare di confinamento quantico. La grandezza di ciascun punto e il numero degli elettroni in esso contenuti possono essere regolati, come pure l'altezza e lo spessore delle barriere tra i punti. Negli spettri di assorbimento ottico di queste strutture compaiono picchi regolari. Questo sorprendente fenomeno testimonia la precisione con cui sono state costruite le schiere - alcune delle quali contengono più di un milione di punti - perché qualsiasi variazione di grandezza degraderebbe gli spettri armonici. Di recente Ray C. Ashoori e Horst L. Störmer degli AT&T hanno misurato la capacità di singoli punti e hanno dimostrato che è possibile catturare un singolo elettrone in ciascuno di essi. Si possono poi aggiungere elettroni uno alla volta, in modo digitale.

Questi risultati schiudono la possibilità di costruire un reticolo planare artificiale in cui si potrebbero regolare pressoché tutte le proprietà degli «atomi» costituenti. Proprio come i singoli punti quantici manifestano livelli di energia analoghi a quelli degli atomi, un reticolo artificiale avrebbe una struttura a bande di energia analoga a quella di un semiconduttore cristallino; potrebbe quindi essere impiegato per studiare molti problemi di fisica quantistica e forse anche per costruire un oscillatore elettronico superveloce.

Finora comunque nessuno ha costruito un reticolo planare artificiale e dimostrato con precisione la sua struttura a bande. Per riuscirvi ci vorrà non solo una puntigliosa precisione nella fabbricazione dell'elettrodo griglia, ma anche uno strenuo controllo dei difetti del sottostante materiale che funge da pozzo quantico. Nei reticoli dei semiconduttori esistenti in natura si può contare sul fatto che tutti gli atomi di silicio, per esempio, sono identici, mentre in un reticolo artificiale questa uniformità dovrà essere imposta ad arte.

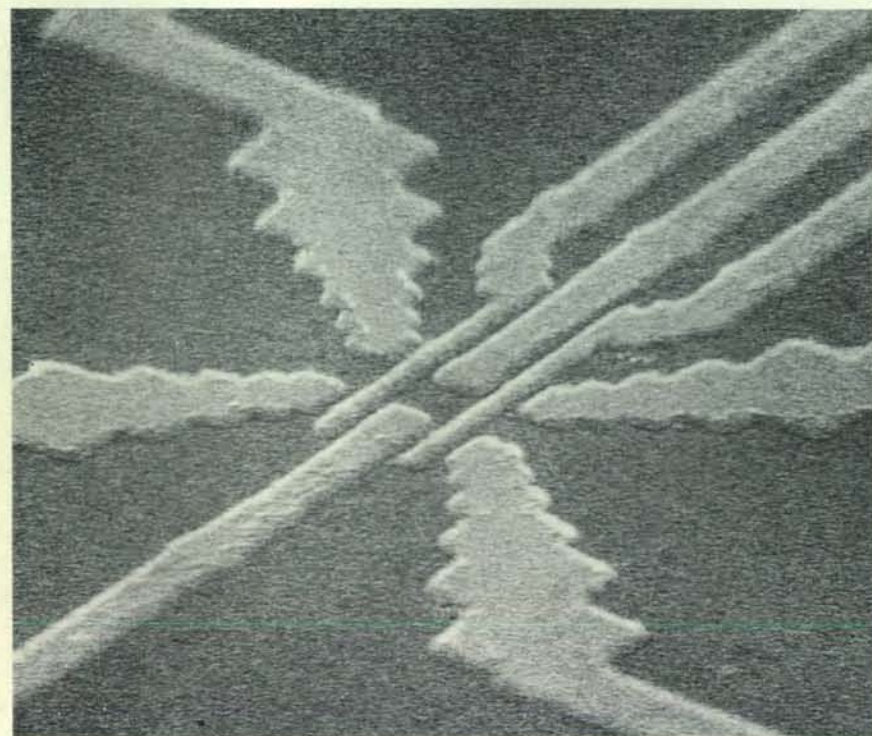
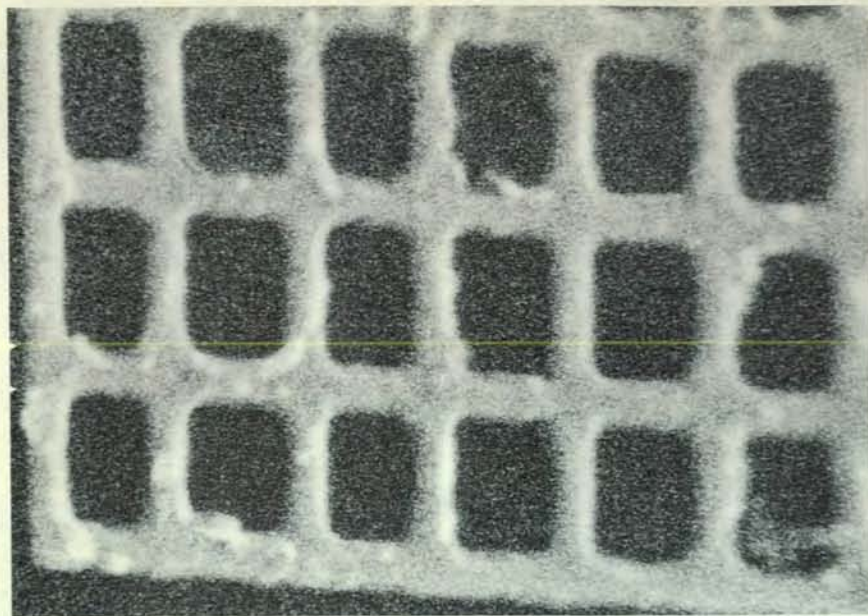
Una svolta straordinaria in questo campo è il reticolo di «antipunti». Se la tensione applicata alla griglia viene invertita, le isole che prima attiravano gli elettroni ora li respingono. Gli elettroni sono obbligati a rimanere negli spazi intermedi e a spostarsi nella schiera rimbalzando sugli antipunti: si tratta probabilmente del più piccolo «biliardino» mai costruito.

In un'altra variante della tecnica della griglia, messa a punto da Kathleen Kash e collaboratori al Bell Communications Research (Bellcore), il confinamento quantico viene imposto mediante una sollecitazione di compressione anziché con elettrodi.

Il gruppo del Bellcore depone uno strato di materiale, il cui reticolo atomico ha una spaziatura diversa da quella del substrato, sopra il materiale che costituisce il pozzo quantico, comprimendolo lateralmente, e poi vi incide la configurazione voluta; nei punti in cui lo strato è asportato la sollecitazione di compressione viene attenuata. Le minuscole variazioni di spaziatura atomica che vengono così prodotte nel materiale del pozzo quantico provocano nei livelli energetici degli elettroni modificazioni che possono costituire punti quantici.

La compressione elettrostatica produce punti nei quali il confinamento quantico è più facile da controllare che non nei punti ottenuti con altri metodi. Fino a poco tempo addietro era impossibile costruire elettrodi abbastanza piccoli per ricavarne barriere a effetto tunnel per un singolo punto ottenuto tramite compressione elettrostatica. Negli ultimi tre anni, tuttavia, numerosi gruppi vi sono riusciti e hanno costruito contatti laterali per punti quantici che costituiscono barriere a effetto tunnel regolabili per via elettrostatica.

Questa struttura consente la regolazione di molte delle variabili che definiscono un punto, tra cui la grandezza, il numero di elettroni e la «trasparenza» delle barriere di confinamento. Questi sistemi sono ideali per affrontare problemi di meccanica quantistica «da manuale», come le proprietà degli stati a zero dimensioni o la probabilità che un elettrone attraversi una barriera per effetto tunnel. Collegando tra loro due punti quantici per farne una molecola artificiale, si può studiare l'accoppiamento tra gli stati di punti quantici adiacenti. Come ha dimostrato Leo P. Kouwenhoven dell'Università di Delft, è anche possibile collegare tra loro molti punti, come in una collana, per ottenere un cristallo artificiale unidimensionale e studiare come si forma la struttura a bande energetiche di un cristallo.

I gruppi di Delft e del MIT hanno scoperto che i livelli energetici di questi piccoli punti quantici sono determinati non solo da regole quantistiche basate sulla dimensione, ma anche dalla quantizzazione della carica dell'elettrone. Il livello energetico di un punto dipende in una certa misura dalla sua capacità e dalla quantità di carica in esso contenuta, che dev'essere naturalmente un multiplo di *e*.

Un punto quantico regolabile è situato all'intersezione degli elettrodi in questa microfotografia. I quattro elettrodi interni «comprimono» nel punto gli elettroni dello strato sommerso del pozzo quantico. Gli elettrodi esterni sono contatti che consentono agli elettroni di entrare e uscire dal punto per effetto tunnel; la frequenza di attraversamento aumenta quando l'energia degli elettroni coincide con i livelli energetici del punto, regolabili a loro volta variando la tensione degli elettrodi interni.

Una griglia di elettrodi crea, nel materiale sottostante, un reticolo di punti quantici che è, di fatto, uno strato cristallino di atomi artificiali i cui livelli di energia si possono regolare con precisione. Le schiere di punti quantici sono utili negli studi di fisica teorica e potrebbero servire per costruire nuovi dispositivi ottici o elettronici.

La coesistenza di questi due tipi di quantizzazione provoca una complessa interazione di effetti. Per capire quale sia il più importante, occorre conoscere non solo la lunghezza d'onda e la massa efficace dell'elettrone contenuto nel punto quantico, ma anche la capacità elettrica del punto stesso. Se è costituito da una particella metallica, il punto possiede molti più elettroni di conduzione rispetto a un semiconduttore; inoltre la lunghezza d'onda degli elettroni di conduzione è solo di pochi decimi di nanometro. Di conseguenza, in un punto metallico di 10 nanometri, la quantizzazione della carica esplica un effetto relativamente molto più intenso che non la quantizzazione della dimensione. Tuttavia la capacità del punto metallico non differisce molto da quella di un punto semiconduttore delle stesse dimensioni e nel semiconduttore l'importanza dei due effetti potrebbe essere più o meno la stessa.

La realizzazione di punti quantici è il coronamento di vent'anni di ricerche, che hanno insegnato agli studiosi a preparare materiali elettronici su misura. Prima degli anni settanta le ricerche di fisica dello stato solido si limitavano ai materiali esistenti in natura. Il miglioramento delle tecniche di epitassia a strato ultrafine conseguito durante quel decennio fornì gli strumenti per fabbricare le strutture bidimensionali che oggi hanno applicazioni tecnologiche diffusissime. Gli sviluppi di questa tecnologia hanno portato a esplorare i dominî di dimensione uno e zero. Tuttavia, affinché queste scoperte possano essere applicate su scala commerciale, è necessario mettere a punto una nuova famiglia di tecniche di fabbricazione.

L'ostacolo più arduo è il difficile raggiungimento di una regolazione pressoché perfetta delle dimensioni e delle impurezze di queste nanostrutture. Senza progressi rivoluzionari nei materiali e nella tecnologia di nanofabbricazione, il metodo di costruzione «dall'alto al basso» (con cui si incidono, si tagliano a cubetti o si comprimono i semiconduttori) potrebbe non essere sufficiente. I prototipi attuali sono grandi (anche se la regione attiva del dispositivo è di grandezza quantica, gli elettrodi e i contatti occupano uno spazio enorme) e funzionano solo a temperatura bassissima.

Inoltre questi dispositivi sono costruiti mediante litografia a fascio elettronico, una tecnologia che non può essere impiegata per fabbricare le grandi quantità di circuiti complessi che renderebbero conveniente la produzione. Sarebbero necessari nuovi metodi litografici che consentissero una regolazione tridimensionale a scala atomica, come la crescita epitassiale strutturata o il montaggio molecolare auto-organizzato. Potrebbe anche essere necessario realizzare nuovi materiali e ideare nuove tecniche di sintesi che coniughino la tecnologia tradizionale dei semiconduttori con impostazioni alternative. Per esempio i ricercatori dei Laboratori Fujitsu, in Giappone, hanno ottenuto fili e punti quantici da polimeri organici. L'ubicazione degli atomi di conduzione nelle molecole del polimero è fissa, sicché questo metodo consente una regolazione molto più fine di quanto sia possibile con la litografia a fascio elettronico. Se il montaggio «dal basso all'alto» dei dispositivi quantici si dimostrerà possibile, i metodi attuali di fabbricazione dei punti appariranno grossolani quanto intagliare libri a partire da un tronco d'albero.

Tuttavia il problema più importante che i ricercatori devono affrontare non è quello di costruire grandi quantità di dispositivi a confinamento quantico, bensì quello di progettare circuiti utili sotto il profilo applicativo che sfruttino le loro potenzialità. Benché le limitazioni tecnologiche alla grandezza dei dispositivi quantici siano in linea teorica notevolmente inferiori a quelle previste per il silicio, il successo dei circuiti quantici sarà determinato dalla loro capacità di competere sul mercato con i progressi che la tecnologia tradizionale del silicio farà nei prossimi dieci anni.

I transistori hanno trovato applicazioni ben al di là del loro impiego iniziale nei ricevitori radio: allo stesso modo le applicazioni ultime dei dispositivi quantici potrebbero essere molto lontane dai problemi del calcolo e delle comunicazioni digitali per i quali sono stati finora studiati. Se si riuscirà a costruire reticoli contenenti milioni o miliardi di punti quantici, specificando la forma e la grandezza di ognuno, diventerà possibile fabbricare tutti i materiali ottici o elettronici concepibili. Si potrebbero progettare a tavolino spettri di emissione e di assorbimento e spettri laser e si potrebbe addirittura costruire una singola fetta di materiale contenente una miriade di minuscoli calcolatori le cui interconnessioni e la cui architettura interna si possano modificare per conformarsi a ciascun nuovo problema da affrontare.

Ma al di là delle applicazioni pratiche dei dispositivi quantici e del nuovo dominio intellettuale che essi schiudono alla fisica sperimentale, i punti quantici sono di per sé allettanti. La possibilità di manipolare la materia alla scala atomica e di creare materiali unici e dispositivi con le proprietà desiderate dal committente esercita un fascino irresistibile e segna un trionfo dell'ingegnosità e dell'immaginazione umane sulle regole naturali di costituzione dei materiali.

BIBLIOGRAFIA

CORCORAN ELIZABETH, *Materiali a dimensione zero?* in «Le Scienze» n. 269, gennaio 1991.

Engineering a Small World: From Atomic Manipulation to Microfabrication, sezione speciale in «Science», 254, 29 novembre 1991.

WEISBUCH CLAUDE e VINTER BORGE, *Quantum Semiconductor Structures: Fundamentals and Applications*, Academic Press, 1991.

KIRK WILEY P. e REED MARK A. (a cura), *Nanostructures and Mesoscopic Systems*, Academic Press, 1992.

Donald O. Hebb e la mente

Correlando il comportamento alle idee e le idee al cervello, Hebb pose le basi delle moderne neuroscienze: la sua teoria del raggruppamento di cellule prefigurò addirittura i modelli al calcolatore delle reti neurali

di Peter M. Milner

Donald O. Hebb, uno dei più influenti psicologi del nostro secolo, iniziò la sua carriera con l'intenzione di divenire romanziere. Ritenendo che la sua vocazione richiedesse una certa conoscenza della psicologia, intraprese un corso di studi che lo portò a condurre ricerche per due decenni. I suoi studi culminarono nel 1949 con la pubblicazione di *L'organizzazione del comportamento*, una pietra miliare delle moderne neuroscienze.

Questa monografia rivoluzionò il settore proponendo l'esistenza di strutture neurali, o raggruppamenti di cellule, che si formano per azione di quella che viene oggi chiamata sinapsi di Hebb. La teoria del raggruppamento di cellule costituì la base teorica dei fondamentali esperimenti di Hebb sull'influenza esercitata sull'intelligenza dell'adulto dalle esperienze precoci con l'ambiente, e anticipò la teoria della rete neurale, oggi attivo filone di ricerca nell'ambito dell'intelligenza artificiale.

L'opera di Hebb giunse nel momento opportuno, perché assestava un duro colpo al comportamentismo proprio nel momento in cui questa scuola di pensiero cominciava a perdere il predominio. I comportamentisti rifiutavano di spiegare il comportamento sia con l'associazione di idee (ipotesi che essi chiamavano mentalismo) sia con l'azione dei neuroni (il cosiddetto fisiologismo). Ma molti psicologi erano ormai stanchi delle artificiose teorie che questi vincoli avevano imposto e furono attratti dal progetto di Hebb e dal suo piacevole stile letterario. Il libro divenne un classico e il nome di Hebb fu ben presto famoso nella cerchia degli psicologi.

Hebb non affermò mai che la sua teoria del 1949 avesse solide basi fisiologiche. Il suo modello offriva agli studiosi qualcosa su cui indagare e, in seguito, via via che la conoscenza del cervello aumentava, divenne possibile formulare le sue idee in termini fisiologici più realistici. Nessuno degli studi successivi ha invalidato l'ipotesi di base di Hebb; anzi, la sua influenza si è andata estendendo in molti settori di ricerca attuali.

Hebb nacque a Chester, una cittadina canadese della Nuova Scozia. I genitori erano medici e i due fratelli e la sorella ne seguirono le orme, ma Donald dimostrò presto la propria indipendenza studiando letteratura (il suo obiettivo era quello di diventare scrittore) e ottenendo la laurea nel 1925 alla Dalhousie University di Halifax. Per guadagnarsi da vivere mentre preparava il suo primo romanzo, insegnò nella scuola della sua città natale. Un anno dopo, in cerca di nuove esperienze, si diresse a ovest, lavorando nelle fattorie. Poi, non essendo riuscito a imbarcarsi come marinaio su un cargo diretto in Cina, tornò all'est e trovò lavoro come operaio nel Quebec.

Nel 1927 un aspirante romanziere doveva conoscere non solo la vita, ma anche le opere di Sigmund Freud. Questa fu l'introduzione alla psicologia per Hebb. Ne fu sufficientemente interessato da iscriversi al Dipartimento di psicologia della McGill University, dove fu accolto nel 1928 come laureando a tempo parziale. Di nuovo si guadagnò da vivere con l'insegnamento e, di nuovo, quello che era iniziato come un interesse temporaneo andò trasformandosi in una professione. Dopo un anno fu nominato direttore di una scuola elementare in un quartiere popolare di Montreal. Deciso a fare dell'apprendimento un'esperienza piacevole, fece in modo che i compiti non venissero assegnati come punizione; gli indisciplinati venivano invece fatti uscire dalla classe e mandati a giocare in cortile. Hebb si appassionò profondamente ai propri esperimenti educativi e accarezzò l'idea di lavorare in questo campo per tutta la vita. Ma due tragici eventi lo dissuasero: prima venne colpito da tubercolosi ossea, che lo costrinse all'immobilità per un anno e lo lasciò leggermente claudicante; poi la moglie, che aveva sposato 18 mesi prima, morì in un incidente automobilistico. Egli decise quindi di lasciare Montreal.

Durante la malattia, Hebb scrisse la tesi di laurea, che lo coinvolse nella controversia tra comportamento innato e comportamento appreso. Nella tesi cercava di spiegare i riflessi spinali come dovuti a condizionamento pavloviano nel feto. In seguito soppresse ogni riferimento a questo lavoro, sia perché aveva cambiato idea in proposito, sia perché era divenuto un oppositore delle ricerche psicologiche prive di basi sperimentali.

Uno dei suoi esaminatori era Boris P. Babkin, un fisiologo che aveva lavorato con Pavlov a San Pietroburgo. Egli raccomandò che Hebb facesse esperienza di laboratorio e lo fece lavorare con un altro emigrato russo, Leonid Andreev. Così Hebb osservò il condizionamento nel cane, e divenne molto meno entusiasta delle tecniche pavloviane. Dopo essersi interrogato a lungo sull'opportunità di continuare gli studi psicologici, nel 1934 decise di tagliare i ponti: chiese un prestito e andò a Chicago per proseguire le sue ricerche di dottorato sotto la guida di Karl S. Lashley.

Questi avrebbe esercitato un influsso profondo sull'approccio di Hebb, soprattutto per l'importanza che dava agli aspetti fisiologici. Lashley non aveva mai dubitato che per comprendere il comportamento si dovesse per prima cosa conoscere il funzionamento del cervello. Mentre lavorava come aiutante di laboratorio nel 1910, aveva recuperato sezioni di cervello di rana dal cesto dei rifiuti e aveva cercato di trovare nelle connessioni tra neuroni qualche indizio che spiegasse il comportamento dell'animale. Lashley eseguì esperimenti per scoprire tracce di memoria nel cervello, inventando tecniche per produrre lesioni cerebrali e valutarne la posizione e l'estensione. Verso il 1930 si era convinto che la memoria non potesse essere immagazzinata in una singola regione del cervello, ma che dovesse essere ampiamente diffusa. Nel 1934, quando Hebb giunse a Chicago, Lashley si stava dedicando allo studio della visione.

Un anno dopo Lashley venne nominato docente alla Harvard University e portò con sé Hebb. Questi dovette ricominciare le proprie ricerche da zero e, avendo denaro solo per un altro anno, cercò un lavoro sperimentale che gli permettesse di completare la tesi di dottorato indipendentemente dai risultati. Egli riuscì a conciliare il proprio interesse per il problema del comportamento con i progetti di Lashley sulla visione studiando l'effetto delle esperienze precoci sullo sviluppo della visione nel ratto.

Contrariamente alle idee empiriste espresse nella sua precedente tesi di laurea, Hebb scoprì che i ratti allevati nella completa oscurità erano in grado di distinguere le dimensioni e la luminosità di una figura con la stessa precisione di ratti allevati normalmente. Questa scoperta indicava che l'organizzazione del sistema visivo era innata e indipendente dagli stimoli ambientali, un'opinione coincidente con quella della scuola della Gestalt, verso la quale Lashley aveva simpatie (si veda l'articolo *L'eredità della psicologia della Gestalt* di Irvin Rock e Stephen Palmer in «Le Scienze» n. 270, febbraio 1991). Ciò che Hebb non notò, benché i risultati fossero riportati in un articolo da lui pubblicato all'epoca, era che i ratti allevati nell'oscurità impiegavano molto più tempo dei ratti normali per imparare a distinguere le righe verticali da quelle orizzontali. Solo molti anni più tardi, dopo aver nuovamente mutato pensiero sulla relativa importanza del meccanismo innato e di quello appreso, egli comprese il significato di questi risultati.

Hebb conseguì il dottorato alla Harvard University nel bel mezzo della grande crisi iniziata nel 1929 e non ebbe quindi alcuna possibilità di trovare lavoro nel campo della psicologia fisiologica. Lavorò perciò per un anno come assistente universitario, incarico che gli permise di continuare i propri studi con Lashley. Nel 1937 il mercato del lavoro non era più favorevole rispetto agli anni precedenti, ma Hebb fu assistito dalla fortuna. La sorella, che stava completando il dottorato in fisiologia alla McGill University, aveva saputo che Wilder Penfield, un chirurgo che aveva appena fondato il Montreal Neurological Institute, cercava qualcuno che studiasse le conseguenze degli interventi chirurgici al cervello sul comportamento dei pazienti. Ne informò subito il fratello che

Donald O. Hebb divenne famoso come studioso teorico, ma fu anche un brillantissimo insegnante. Questa fotografia lo ritrae in occasione di un seminario tenuto verso la fine degli anni sessanta.

riuscì a ottenere un contratto biennale. Risposatosi, Hebb tornò a Montreal: il giovane che aveva pensato di sfuggire alla vocazione famigliare per diventare romanziere si trovò a far parte di un gruppo di medici che apriva nuove vie alla terapia delle patologie neurologiche.

Penfield, specialista nel trattamento dell'epilessia focale per rimozione chirurgica di aree lese della corteccia cerebrale, sapeva di intervenire sull'organo della mente ed era consapevole del fatto che una mossa sbagliata poteva privare il paziente della capacità di parola, di comportamento intelligente e persino di coscienza. Sebbene Penfield non fosse psicologo, aveva ben chiaro il legame che esisteva fra mente e sistema nervoso. Questa esperienza influì senza dubbio sulla sua decisione di accogliere psicologi nel suo gruppo e spiega il suo interesse per le loro osservazioni.

Il principale compito di Hebb consisteva nello studiare la natura e l'entità delle alterazioni intellettive che si verificavano nei pazienti in seguito all'asportazione di regioni della corteccia. Queste ricerche non erano nuove: avevano avuto inizio dopo la prima guerra mondiale con l'esame psicometrico di soldati che avevano subìto ferite penetranti al capo ed erano continuate poi in pazienti affetti da tumori cerebrali. In molti casi queste lesioni provocavano una perdita considerevole delle capacità cognitive, ma era difficile determinarne la localizzazione e l'entità. Al contrario, l'area di un intervento chirurgico è delimitata con maggior precisione, e le lesioni epilettiche non causano danni estesi quanto un proiettile o un tumore.

Hebb si trovò ben presto di fronte a uno strano problema. All'epoca gli psicologi consideravano i lobi frontali della corteccia cerebrale come sede dell'intelligenza nell'uomo, in quanto questa regione è relativamente più grande delle aree corrispondenti in animali con minore intelligenza. Tuttavia Hebb non rilevò una perdita di capacità cognitive in pazienti i cui lobi frontali erano stati distrutti a causa di un incidente o di interventi chirurgici. Questo strano fenomeno impressionò profondamente Hebb e gli ispirò la ricerca di una teoria del cervello e del comportamento intelligente.

Sebbene le sue osservazioni gli permettessero di seguire un filone di ricerca che si rivelò fruttuoso, lavori successivi dimostrarono che Hebb si era fidato eccessivamente degli ordinari test di intelligenza. Brenda Milner, una sua allieva che proseguì gli studi da lui iniziati sui pazienti di Penfield, scoprì infatti che le lesioni dei lobi frontali spesso provocano nel soggetto qualche difficoltà ad abbandonare un comportamento divenuto inappropriato. Per quanto non siano rilevabili con i test di intelligenza, i mutamenti della personalità in seguito a danni ai lobi frontali influiscono profondamente sulla vita del paziente.

Al termine del suo contratto presso l'istituto neurologico, Hebb trovò finalmente un lavoro stabile alla Queen's University di Kingston, nell'Ontario. Qui, nonostante le gravose responsabilità dell'insegnamento, continuò a occuparsi del problema dell'intelligenza. In collaborazione con uno studente, Kenneth Williams, mise a punto un labirinto per ratti a percorso variabile come analogo dei test di intelligenza per l'uomo. Il labirinto di Hebb-Williams fu ampiamente utilizzato nel successivo quarto di secolo, ma Hebb andava più orgoglioso di un articolo teorico nel quale - basandosi sui risultati delle sue ricerche presso il Montreal Neurological Institute - aveva proposto che l'intelligenza dell'adulto fosse influenzata in modo decisivo dalle esperienze infantili. L'articolo, pressoché ignorato all'epoca, è oggi considerato un caposaldo e viene adottato in alcuni corsi per insegnanti di scuola materna. Ma era un concetto troppo avanzato per il suo tempo: nel 1940 la maggior parte degli psicologi definiva l'intelligenza più o meno come una caratteristica innata.

Per conciliare i suoi studi sulle influenze nell'infanzia con l'apparente innocuità delle lesioni dei lobi frontali, Hebb ipotizzò che la funzione principale di questa regione non fosse quella di pensare, ma di facilitare l'enorme acquisizione di conoscenza che si ha nei primi anni di vita. Gli esperimenti volti a determinare gli effetti relativi di lesioni cerebrali avvenute precocemente o in età più avanzata non confermarono sempre questa ipotesi, ma costituirono un punto di partenza per teorie successive.

Il raggruppamento di cellule di Hebb è costituito da neuroni paralleli che collegano gli ingressi retinici con punti corrispondenti della corteccia visiva i quali, a loro volta, si connettono con la corteccia associativa. Segnali convergenti attivano le cellule nervose e i relativi circuiti (*in rosso scuro*). I cambiamenti sinaptici conseguenti permettono al circuito di funzionare con bassi livelli di stimolo producendo un segnale in uscita che rappresenta al cervello ciò che l'occhio vede.

L'affaticamento retinico conferma la teoria del raggruppamento di cellule facendo sì che le immagini si dissolvano in modo particolare. L'apparecchio proietta un'immagine fissa sui recettori della retina fino a quando il segnale decade; a questo punto l'immagine svanisce una o due righe per volta. Hebb sostenne che ogni riga è rappresentata da un circuito di retroazione. Quando il segnale retinico scende al di sotto del valore critico, il circuito cessa di oscillare e la riga scompare.

Divenuto direttore degli Yerkes Laboratories of Primate Biology in Florida, nel 1942 Lashley invitò Hebb a unirsi al suo gruppo di studio sul comportamento degli scimpanzé. Hebb esultò alla prospettiva di fare nuovamente ricerca a tempo pieno con Lashley, sebbene in un primo tempo non fosse molto entusiasta di lavorare sugli scimpanzé. Lashley intendeva mettere a punto test di apprendimento e di risoluzione di problemi per questi animali, mentre Hebb avrebbe dovuto studiarne la personalità e le caratteristiche emotive. In seguito i due avrebbero iniziato un programma per determinare in che modo le lesioni cerebrali influissero su alcune variabili.

Questo esperimento di isolamento estese lo studio della deprivazione sensoriale oltre l'ambito dei singoli raggruppamenti di cellule. Fasciature sopprimevano il tatto, uno schermo di plastica impediva la visione e un cuscinetto avvolgente attenuava i suoni che filtravano nonostante il condizionatore. Gli elettrodi di un apparecchio per elettroencefalogramma registravano le onde cerebrali del soggetto e un microfono gli permetteva di descrivere le proprie esperienze. In queste condizioni le capacità di pensiero dei volontari si deterioravano e alcuni avevano allucinazioni.

Gli scimpanzé si dimostrarono più difficili da addestrare di quanto Lashley avesse immaginato, e i ritardi fecero sì che durante la permanenza di Hebb a Yerkes non venisse eseguito alcun intervento cerebrale. Tuttavia fu tanto affascinato dalle osservazioni sugli scimpanzé da dichiarare di aver imparato di più sulla personalità umana nei cinque anni di contatto con questi primati che non in qualsiasi altro periodo successivo ai suoi primi cinque anni di vita. Questi animali manifestavano personalità definite e un senso dell'umorismo che tendeva alla buffoneria. Ma Hebb e i suoi collaboratori ricavarono un divertimento più intellettuale dalle acrobazie verbali dei comportamentisti ortodossi in visita al laboratorio, che cercavano di descrivere gli scherzi e le buffonate degli animali senza ricorrere a un linguaggio «mentalistico».

La lunga e attenta osservazione degli scimpanzé in laboratorio insegnò a Hebb che l'esperienza non era l'unico fattore nello sviluppo della personalità, e anche di manifestazioni patologiche come le fobie. Dimostrò, per esempio, che giovani scimpanzé nati in laboratorio, che non avevano mai visto un serpente, si spaventavano quando ne vedevano uno per la prima volta. Gli scimpanzé sono impauriti anche da teste finte scimmiesche o umane o da altre parti del corpo isolate, oppure da guardiani che conoscono bene, ma che indossano abiti insoliti. Inoltre Hebb fu uno dei primi a osservare il comportamento di focene in cattività e a proporre che implicasse un livello di intelligenza paragonabile a quello delle scimmie antropomorfe. Queste osservazioni hanno forse influito sulla sua ipotesi che le capacità dimostrate durante il gioco costituiscono un buon indice di intelligenza.

L'interesse di Lashley per il modo in cui il cervello trasforma gli stimoli percettivi in conoscenze del mondo riaccese la curiosità di Hebb per i concetti e il pensiero: in che modo il cervello impara ad assimilare un triangolo, un'automobile o un cane a un altro oggetto della stessa categoria anche se non esistono due triangoli, due automobili o due cani che producano lo stesso tipo di stimolo sui recettori sensoriali?

La svolta si ebbe quando Hebb lesse i lavori di Rafael Lorente de Nó, un neurofisiologo del Rockefeller Institute for Medical Research, che aveva scoperto circuiti di retroazione nei neuroni cerebrali. Fino ad allora tutte le teorie psicologiche, che fossero fisiologiche o meno, davano per scontato che l'informazione passasse nell'organismo su un binario singolo, come fa il cibo attraverso l'apparato digerente. Hebb riconobbe che i circuiti di Lorente erano proprio ciò che gli serviva per mettere a punto una teoria più realistica della mente.

La retroazione non era un concetto del tutto nuovo nella teoria dell'apprendimento. Quasi tutti i modelli assumevano che i segnali in uscita dall'organismo influenzassero in qualche modo quelli in entrata permettendo, per esempio all'animale di ricevere uno stimolo di rinforzo. Purtroppo, una retroazione che procedesse in questo modo, su un percorso singolo, sarebbe lenta e inaffidabile. Ma, con milioni di circuiti di retroazione interconnessi, sarebbe possibile stabilire modelli interni dell'ambiente tali da far prevedere gli effetti delle risposte senza muovere un muscolo.

La specializzazione di Hebb nel campo della visione lo portò a concentrare le sue prime teorie su quel sistema. Sapendo che la proiezione da punto a punto dalla retina alla corteccia non si estende al di là della corteccia visiva primaria, suppose che i nodi di interscambio lungo i neuroni inviassero proiezioni in direzioni casuali nella corteccia circostante, rimescolando così l'immagine retinica (si veda l'articolo *L'elaborazione dell'immagine visiva* di Semir Zeki in «Le Scienze» n. 291, novembre 1992). Un simile meccanismo ricombinerebbe i segnali provenienti da parti diverse dell'immagine e li farebbe convergere su uno stesso neurone bersaglio, provocandone la scarica. Gli impulsi risultanti potrebbero allora tornare ai neuroni antecedenti lungo il percorso e chiudere così il ciclo di retroazione.

L'attivazione ripetuta di un dato circuito potrebbe rafforzarlo nel modo seguente. Se l'assone di un neurone «di ingresso» è abbastanza vicino da eccitare un neurone bersaglio, e se esso prende parte costantemente all'attivazione del neurone bersaglio, in una o in entrambe le cellule avviene un processo di crescita che aumenta l'efficienza della stimolazione del neurone di ingresso. Le sinapsi che si comportano in questo modo hanno preso il nome di sinapsi di Hebb, il che divertì parecchio lo stesso Hebb, dato che questo aspetto è uno dei pochi punti della sua teoria che egli non considerava completamente originale. Qualcosa di analogo era stato proposto da molti psicologi, ivi compreso Freud nei suoi primi studi di neurobiologia.

Nondimeno, fu Hebb a fare l'enunciazione più chiara e formale di questo postulato, anche se nel 1949 non era che pura speculazione. Da allora, però, lo studio di singoli neuroni ha confermato che la forza delle sinapsi può variare

Hebb ebbe numerosi allievi e seguaci che fecero conoscere il suo pensiero. Qui, in un seminario avanzato tenuto all'inizio degli anni cinquanta, Hebb appare all'estrema destra; l'autore è in primo piano. I partecipanti al seminario furono tra i fondatori della nuova disciplina della psicologia fisiologica.

BEN DOAN *Dalhousie University* — HELEN MAHUT *Northeastern University* — PETER MILNER *McGill University* — JIM OLDS *Caltech* (DECEDUTO) — G. ROLFE MORRISON *McMaster University* — NON IDENTIFICATO — SETH SHARPLESS *Università del Colorado, Boulder* — DONALD O. HEBB *McGill University* (DECEDUTO)

conformemente al postulato. Forse Hebb aveva ragione anche riguardo al meccanismi del cambiamento permanente. Un suo allievo, Aryeh Routtenberg della Northwestern University, ha di recente osservato che una proteina associata alla crescita dei neuroni viene prodotta quando questi sono stimolati in modo tale da aumentare la forza delle sinapsi.

Hebb formulò l'ipotesi che la maggior parte delle sinapsi della rete corticale sia inizialmente troppo debole per attivarsi spontaneamente. Ci vorrebbe, infatti, una convergenza di stimoli provenienti da diversi neuroni attivi. Alcuni neuroni della rete ricevono segnali convergenti, e quindi scaricano, quando un particolare insieme di neuroni della corteccia sensoriale è attivato da uno stimolo. Alcuni dei neuroni attivati hanno connessioni sinaptiche reciproche, anch'esse rafforzate ogni volta che si presenta lo stimolo. Alla fine le connessioni fra i neuroni della rete che scaricano simultaneamente diventano abbastanza forti da continuare ad attivarsi a vicenda anche in assenza di un segnale d'ingresso, dando origine a una rappresentazione interna dello stimolo che Hebb definì «raggruppamento di cellule».

Il concetto di raggruppamento di cellule è stato, a mio modo di vedere, il maggior contributo dato da Hebb alla teoria psicologica, per non parlare della filosofia. Ha restituito credito al tentativo degli psicologi del XIX secolo di spiegare il comportamento in termini di associazione di idee, progetto che i comportamentisti avevano svalutato sostenendo che le «idee» non erano più reali delle convinzioni che vi fossero omuncoli all'interno della testa. Essi affermavano pertanto che le idee, e quindi il mentalismo, non avevano un posto nella psicologia scientifica.

Pochi sembrarono notare che i comportamentisti avevano sostituito le idee con costrutti ugualmente vaghi e dalle definizioni ambigue, come «stimoli» e «risposte». Non si trattava di veri eventi o successioni di eventi, ma di attributi che si associavano l'un l'altro in una qualche immaginaria scatola nera che era proibito chiamare cervello. Hebb pose fine a questa situazione dimostrando, almeno in linea di principio, che per le idee può essere individuata una base fisica altrettanto solida che per i movimenti muscolari. Le idee possono essere costituite da schemi appresi di scarica dei neuroni cerebrali che, inizialmente guidati dai segnali sensoriali, alla fine possono assumere esistenza autonoma.

Nella forma originaria, la teoria neurale era certamente troppo semplice per funzionare: il raggruppamento di cellule non prevedeva meccanismi inibitori, dato che la scienza dell'epoca non li riconosceva. Sir John C. Eccles, neurofisiologo molto influente della Australian National University di Canberra, negava ancora con energia l'esistenza di sinapsi inibitorie. Inoltre non erano ancora state scoperte molte importanti connessioni della neocorteccia, e il significato funzionale della diversità dei neuroni corticali era stato appena intravvisto.

In assenza di fattori di inibizione, tuttavia, l'apprendimento avrebbe rafforzato le connessioni sinaptiche finché tutti i neuroni avrebbero scaricato di continuo, rendendo inutile il sistema. Questo effetto fu osservato in modelli al calcolatore del raggruppamento cellulare, chiamati concettori, costruiti negli anni cinquanta da Nathaniel Rochester e colleghi del laboratorio di ricerca della IBM a Poughkeepsie (New York). Sembra che Hebb non abbia mai personalmente messo mano al calcolatore per verificare l'ipotesi che reti nervose casuali possano organizzarsi in modo da immagazzinare e recuperare informazioni. Ma queste cosiddette reti neurali hanno ispirato molti modelli al calcolatore, dalla macchina percettiva, o perceptrone, all'elaborazione parallela distribuita, trovando anche applicazioni industriali.

All'epoca della pubblicazione dell'opera *L'organizzazione del comportamento* Hebb era tornato a Montreal come preside del Dipartimento di psicologia della McGill University. Dieci anni dopo, quando lasciò l'incarico, aveva organizzato uno dei migliori dipartimenti del Nord America. Il suo compito fu facilitato dal fatto che, al suo arrivo, il Dipartimento esisteva quasi solo sulla carta ed egli si rivelò abile sia nella politica universitaria sia nello sfruttare la sua crescente reputazione.

Gran parte delle ricerche svolte da Hebb alla McGill University verteva sulla sua teoria del raggruppamento di cellule. La metodologia dell'epoca rendeva tuttavia impossibile cercare di ottenere le prove fisiologiche della teoria (e tuttora il problema sussiste); egli preferì quindi dedicarsi a controllare come essa riusciva a prevedere il comportamento. Cercò, per esempio, di confermare le sue ipotesi riguardo all'influenza dell'allevamento sulla intelligenza dell'adulto. Gran parte dei risultati suffragò la teoria che animali allevati in un ambiente ricco, ossia più complesso, hanno più tardi migliori prestazioni di quelli cresciuti in una nuda gabbia.

Vi fu un'eccezione imbarazzante. Alcune cucciolate di pastore scozzese vennero divise, e metà dei cuccioli fu allevata nelle case dei membri del gruppo, mentre l'altra metà era tenuta in gabbie di laboratorio. Hebb non fu fortunato nella scelta del cucciolo, Henry. Esso si rivelò assolutamente incapace di orientarsi: si perdeva invariabilmente non appena lasciava i dintorni della casa e più di una volta dovette essere recuperato dal canile. Naturalmente Henry risultò tra i peggiori quando, una volta adulto, venne sottoposto al test del labirinto.

In una serie correlata di esperimenti, Hebb studiò gli effetti di una riduzione degli stimoli sensoriali sul comportamento degli adulti, compresi volontari umani. Alcuni studenti vennero pagati profumatamente perché si sottoponessero il più a lungo possibile a una drastica deprivazione sensoriale (nessuno resistette almeno una settimana). Si vide che la loro capacità di ragionamento si deteriorava rapidamente e alcuni avevano addirittura allucinazioni. A quell'epoca era in corso la guerra di Corea e molti studiosi cercarono di sfruttare questi esperimenti di isolamento per comprendere e contrastare le tecniche di «lavaggio del cervello» usate dai cinesi.

Hebb continuò a lavorare anche all'ipotesi che una lesione cerebrale dovesse essere più dannosa nel giovane che nell'adulto. Ma i risultati furono incerti a causa di diversi fattori, il più importante dei quali era la capacità posseduta dal cervello di un giovane di riorganizzarsi. Per esempio, se un bambino subisce una lesione in un'area dell'emisfero sinistro rilevante per la capacità di parola nell'adulto, l'emisfero destro assume questa funzione e le capacità linguistiche non sono gravemente compromesse. Ma se un adulto subisce un danno nella stessa area, ne può derivare una perdita permanente della capacità di parola.

In seguito a questi problemi riguardanti lo studio delle capacità mentali, Hebb si convinse che la dimostrazione più chiara della teoria dei raggruppamenti di cellule poteva venire da esperimenti sulla dissolvenza retinica. Immagini di forme semplici venivano proiettate sull'occhio da un minuscolo sistema di lenti fissato a una lente a contatto, in modo tale che l'immagine cadesse sempre sul medesimo punto. Via via che i recettori della retina si affaticavano, l'immagine sbiadiva e scompariva, ma non tutta insieme. Di solito sparivano all'improvviso intere righe, una o due per volta, finché si dissolveva l'intera figura. Hebb spiegò il fenomeno affermando che ciascuna riga è rappresentata dalla propagazione di attività nervosa lungo un circuito. L'attività, una volta iniziata, continua anche dopo che il segnale retinico è caduto a un livello molto basso a causa della retroazione nel circuito. Ma a un certo valore critico, il fenomeno cessa bruscamente e la riga scompare. Questi esperimenti non dimostrano in modo conclusivo la teoria del raggruppamento di cellule come la ideò Hebb. Tuttavia, anche se la sua esposizione dovesse rivelarsi scorretta, non verrebbe ridotto il valore dell'ipotesi che una certa attività nervosa possa continuare a rappresentare l'oggetto anche dopo la cessazione dello stimolo sensoriale.

Se *L'organizzazione del comportamento* avesse contenuto solo i capitoli in cui Hebb criticava i metodi dell'epoca ed esponeva la teoria del raggruppamento di cellule, forse ben pochi lo avrebbero letto. Il fascino dell'opera sta nella seconda parte, in cui Hebb discute le emozioni, la motivazione, le malattie mentali e l'intelligenza dell'uomo e di altre specie alla luce della sua teoria in una serie di saggi sorprendentemente accessibili.

Hebb sviluppò il suo Dipartimento e il suo campo di studi attirando fin dall'inizio l'interesse degli studenti migliori. Teneva egli stesso il corso introduttivo, che era incredibilmente seguito: a un certo punto contava 1500 studenti, quasi metà delle matricole. Molti futuri docenti di psicologia hanno scoperto la loro vocazione in queste lezioni. Come molte delle cose fatte da Hebb, il suo corso era unico; nessun testo dell'epoca includeva neppure lontanamente tutto il materiale e le idee di cui egli trattava, sicché Hebb finì per scrivere il libro di testo per il suo corso: la prima edizione del *Manuale di psicologia* fu stampata nel 1958.

Hebb tenne anche seminari avanzati a cui parteciparono tutti i dottorandi di psicologia passati alla McGill University nell'arco di 30 anni. Era famoso non solo per l'eloquio stimolante, ma anche per l'onnipresente cronometro e i fogli di carta su cui annotava una pronuncia scorretta o un altro errore di esposizione. Era intenzione di Hebb fare in modo che nessuno dei suoi studenti superasse il limite di tempo assegnato a un convegno, e nel complesso vi riuscì. Nel 1970 l'università onorò Hebb nominandolo rettore onorario; egli divenne così l'unico membro del corpo docente che avesse mai ricoperto quell'incarico.

Nel 1977 Hebb si ritirò nella città natale, dove portò a compimento la sua ultima opera, *Mente e pensiero*. Fu nominato professore onorario alla Dalhousie University dove aveva compiuto i suoi studi letterari e dove partecipò regolarmente ai convegni che vi si tenevano fino alla morte, avvenuta nel 1985 all'età di 81 anni.

BIBLIOGRAFIA

HEBB D. O., *Manuale di psicologia*, La Nuova Italia, Firenze, 1974.

HEBB D. O., *L'organizzazione del comportamento. Una teoria neuropsicologica*, Franco Angeli, Milano, 1975.

HEBB D. O., *Mente e pensiero*, il Mulino, Bologna, 1982.

FERRY G., *Parallel Learning in Brains and Machines* in «New Scientist», 109, n. 1499, 13 marzo 1986.

Mente e cervello, numero speciale di «Le Scienze», n. 291, novembre 1992.